

# Umwelttechnik in Baden-Württemberg



## Entwicklung und Erprobung eines auf Metallschaum basierenden Systems (Demonstrator) zur regenerativen Nutzung und Speicherung von Abwärme aus Energiegewinnungsprozessen - MSTOR -

Abschlussbericht zum Förderprogramm  
"EFRE Umwelttechnik"  
des Ministeriums für Umwelt, Klima und  
Energiewirtschaft Baden-Württemberg



Europäische Union  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

investition in  
Ihre Zukunft!



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

# Umwelttechnik in Baden-Württemberg

## Autoren:

Aron Kneer  
TinniT Technologies GmbH  
Erbprinzenstr. 32,  
76133 Karlsruhe

Britta Nestler, Eckhardt Martens  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Bernd Bantle  
engtec GmbH  
Schramberg-Waldmössingen

Thomas Kotitschke  
Phoenix Solar AG, Ulm

Förderkennzeichen: UT 270 -272  
Laufzeit: 23.11.2010 - 31.08.2012

Das Projekt wurde je zur Hälfte mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen des Operationellen Programms für das Ziel „Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung“ und mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

November 2012



Europäische Union  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

investition in  
Ihre Zukunft!



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Theoretische Grundlagen und Anforderungen .....	5
	2.1 Speicherprinzipien .....	5
	2.2 Vergleich von Latent- mit Wasserwärmespeichern .....	7
	2.3 Metallschaum / metallische Strukturen.....	8
	2.3.1 Metallschaum .....	8
	2.3.2 Metallstrukturen.....	9
	2.4 Geometrie .....	9
	2.5 Zusammenfassung.....	10
3	Auslegung des Einzelspeichermoduls.....	11
	3.1 Vorversuche.....	11
	3.1.1 Allgemeiner Versuchsaufbau.....	11
	3.1.2 Versuchskonfiguration .....	12
	3.1.3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse .....	14
	3.2 Validierung Berechnungsverfahren (CFD) durch gezielte Nachrechnung.....	15
	3.2.1 Modellbildung .....	16
	3.2.2 Berechnungsergebnisse.....	17
	3.3 Vorauslegung durch Virtual Prototyping.....	17
	3.3.1 Einleitung zur Modellbildung.....	18
	3.3.2 Geometrievarianten .....	19
	3.3.3 Berechnungsmodell.....	19
	3.3.4 Berechnungsergebnisse.....	21
	3.3.5 Resultierendes Design als Ausgangsbasis für die Konstruktion.....	24
4	Konstruktion des Latentwärmespeichers.....	25
	4.1 Konzeptfindung .....	25
	4.2 Gesamtfunktion.....	26
	4.2.1 Speichermodul.....	26
	4.2.2 Rohrwendel .....	28
	4.2.3 Speicherkonstruktion komplett .....	28
5	Experimentelle Untersuchungen .....	29

5.1 Erprobung Einzelspeicher .....	30
5.1.1 Einzelversuchsstand.....	30
5.1.2 Versuchsdurchführung .....	34
5.1.3 Versuchsergebnisse .....	35
5.2 Versuche zur Verschaltung der Einzelspeicher.....	37
5.2.1 Versuchsaufbau.....	37
5.2.2 Versuchsergebnisse .....	40
6 Simulationsstudien .....	43
6.1 Studien zu Phasenwechselfvorgängen .....	43
6.1.2 Pre- und Postprocessing .....	43
6.1.3 Benchmark .....	45
6.1.4 Rolle der Oberflächenspannung für die Phasenumwandlung von Paraffin46	
6.1.5 Phasenumwandlung in 2D (Pace3D / StarCCM+) .....	47
6.1.5 Phasenumwandlung in den Poren von offenporigen Metallschäumen .....	49
6.2 Nachrechnungen (CFD) .....	50
6.2.1 Modellbildung und Netzgenerierung.....	50
6.2.2 Anfangs- und Randbedingungen.....	51
6.2.3 Berechnungsergebnisse.....	52
7 Finaler Demonstrator.....	56
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	57



# 1 Einleitung

Bei Energiegewinnungsprozessen entsteht neben der elektrischen Leistung auch eine thermische Leistung, die zur Erhöhung des Wirkungsgrades des Gesamtsystems ausgenutzt werden kann. Der Transport von thermischer Energie und deren Speicherung bedarf eines Systems, das kurze Reaktionszeiten aufweist und gleichzeitig unterschiedliche Energiemengen für deren spätere Nutzung speichert. Klassischerweise werden sogenannte kapazitive Speicher wie Wasser oder Strukturkörper verwendet, wobei diese je nach zu speichernder Energiemenge schnell große Volumina benötigen. Gleichzeitig ist das zeitliche Verhalten der Einspeicherung bzw. der Entnahme von Wärmeenergie aufgrund der größeren Wärmeeindringzeiten z.B. für Tagesspeicher meist nicht ausreichend. Alternativ zu diesen kapazitiven Speichern existieren Latentwärmespeicher, die die Besonderheit eines Phasenwechsels (fest-flüssig, flüssig-fest) aufweisen und somit bei kleinerem Volumen eine erhöhte Menge an thermischer Energie aufnehmen können. Aber auch für diese effektiven Speicher kann thermische Energie oftmals nicht schnell genug eingebracht werden, da die Wärmeleitungseigenschaften des Latentspeichers (z.B. Paraffin) begrenzt sind. Dieser Nachteil wurde durch den Einsatz offenporiger Metallschäume / Metallstrukturen, die von einem PCM (Phase Change Material) umgeben sind, kompensiert.

Im Rahmen dieses Verbundprojektes wurde ein an der HS-Karlsruhe vorhandenes Blockheizkraftwerk, das für die Verbrennung von Biogas/Holzgas, Klärgas, Deponiegas und Pflanzenöl erprobt wird, um einen Latentwärmespeicher erweitert, um die Speicherung der thermischen Leistung anhand des im Projekt entwickelten Latentwärmespeichers versuchstechnisch zu erproben und essentielle Parameter der räumlichen und zeitlichen Wärmeaufnahme bzw. -entnahme zu ermitteln. Die Erprobung des Latentwärmespeicherkonzeptes erfolgte in fünf essentiellen Phasen:

- Anforderung an einen Latentwärmespeicher
- Analytische und numerische Vorauslegung und Designfindung
- Experimentelle Erprobung Einzelkomponenten
- Optimierung, Ableitung Demonstratorkonzept
- Bau, Inbetriebnahme, Erprobung Demonstrator

Zu den wesentlichen Aufgaben, die innerhalb des Vorhabens zu lösen waren, gehören die Entwicklung, Auslegung und Konstruktion eines geeigneten Speicherkonzeptes, der Bau des Speichers, dessen Anbindung an das vorhandene Blockheizkraftwerk und die Entwicklung einer geeigneten Simulationsumgebung auf Basis der erzielten Ergebnisse aus den Versuchen, um somit die numerischen Voraussetzungen für die Auslegung von Speichern im realen Einsatz zu schaffen. Das Demonstrationsprojekt benötigte somit eine hohe Synergie zwischen den einzelnen Partnern und diente somit der Förderung des Wissenstransfers der Forschungseinrichtung zum Bereich Konstruktion und Bau von Speichertechnologien, und darüber hinaus entstanden wertvolle Algorithmen zur geeigneten Auslegung eines auf Metallschaum / Metallstegen basierten Latentwärmespeichers mit integriertem Phasenwechselmodul zur Berechnung der latent speicherbaren Energie.

## 2 Theoretische Grundlagen und Anforderungen

Wärmespeicher sind Systeme, die thermische Energie über einen endlichen Zeitraum speichern. Sie gehören der Gruppe der „Halbdirekten Wärmeübertrager“ an, da die beiden Fluidströme, die für die Be- und Entladung verantwortlich sind, zeitlich voneinander getrennt sind. Die Wärmeenergie wird über ein Wärmeträgermedium zum eigentlichen Speicher geführt, wo sie im Wärmespeichermedium aufbewahrt wird. Hier wird die gespeicherte Wärmeenergie, zu einem späteren Zeitpunkt, über den Wärmeverbraucherkreislauf abgeführt. Es handelt sich dabei um einen reversiblen Zyklus. Daher ist die Zyklenstabilität für einen Wärmespeicher besonders wichtig. Weitere typische Anforderungen an einem Wärmespeicher sind in Abb. 1 dargestellt.

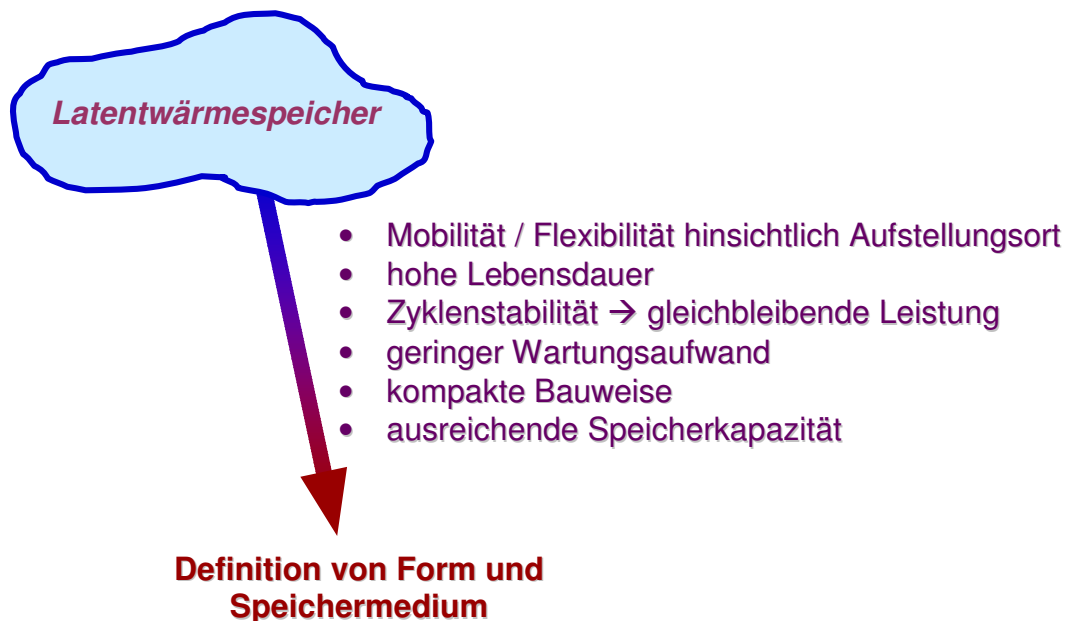


Abbildung 1: Anforderungen an einen Latentwärmespeicher

Beim Speichern der Wärme wird zwischen drei unterschiedlichen Speicherprinzipien unterschieden, die im nächsten Abschnitt näher erläutert werden.

### 2.1 Speicherprinzipien

- Die **sensible Wärme**, auch fühlbare Wärme genannt, ist diejenige Wärmeenergie, welche aufgrund einer Temperaturdifferenz in einem Medium gespeichert wird. Bei der Speicherung erhöht sich also die Speichermediumtemperatur. Die Menge der möglichen gespeicherten Energie, auch Speicherdichte genannt, hängt von der Masse  $m$  und der Wärmekapazität  $c_p$  des Speichermediums sowie der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ab. Typische Speichermedien, die im sensiblen Bereich eingesetzt werden, sind Wasser, geschmolzene Salze, Beton oder das Erdreich. Meistens wird allerdings Wasser als Speichermedium verwendet.

- Die **latente Wärme** ist diejenige Wärme, die bei einem Phasenübergang eines Mediums in diesem gespeichert oder von diesem abgegeben wird. Solange das latente Speichermedium sich im Phasenübergang befindet, wird all die zugeführte Wärmeenergie als latente Wärme gespeichert. Die Temperatur des Speichermediums bleibt dabei nahezu konstant. Aufgrund der großen Sprünge der Volumenänderung beim Verdampfen sowie Kondensieren findet nur das Erstarren bzw. Schmelzen in der Technik Anwendung. Die Speicherdichte von latenten Speichermedien setzt sich aus dem sensiblen und dem latenten Anteil zusammen, wobei der latente Anteil von der Schmelzenthalpie  $\Delta h$  sowie der Masse  $m$  abhängt und nur beim Unter- bzw. Überschreiten des Schmelz- bzw. Siedepunktes zu berücksichtigen ist. Typische latente Speichermedien sind z.B. Salzhydrate oder Paraffine, wobei Paraffine die bessere Zyklenstabilität besitzen.
- Bei **thermochemischen** Wärmespeichern wird die zu speichernde Wärmeenergie zum großen Teil zur Aufspaltung der Bindungen von miteinander verbundenen Reaktionspartnern verwendet. Dabei werden Stoffe benutzt, bei denen die Reaktion umkehrbar ist, somit wird die mehrmalige Verwendbarkeit gewährleistet. Bei der Aufspaltung werden die Reaktionspartner getrennt und liegen nebeneinander vor. Durch die räumliche Trennung ist eine theoretisch verlustfreie Langzeitspeicherung von Energie möglich. Der Arbeitstemperaturbereich von thermochemischen Speichern liegt oberhalb von 120 °C, deswegen ist diese Art der Wärmespeicherung für die gegebene Anwendung nicht interessant.



Abbildung 1: Paraffin RT58 (Lieferant Rubitherm)

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde für den Einsatz eines PCM's im üblichen Temperaturbereich für Haushalte (Warmwasser, Heizungsunterstützung) Paraffin ausgesucht. Paraffin ist zyklenstabil, unschädlich und mit unterschiedlichen Schmelzpunkten zu erwerben. Durch den variablen Schmelzpunkt kann ein Paraffin ausgesucht werden, welches auf den gegebenen Temperaturbereich abgestimmt ist. Der Vorteil der größeren Speicherdichte gegenüber Wasser wird im nächsten Abschnitt erläutert.

### 2.2 Vergleich von Latent- mit Wasserwärmespeichern

Zur Veranschaulichung wird hier ein Vergleich zwischen den beiden Speichermedien Wasser und Paraffin durchgeführt. Gängige Wärmespeicher werden mit Wasser als Speichermedium ausgeführt. Deswegen dient hier ein Pufferspeicher auf Basis von Wasser als Speichermedium zum Vergleich. Auf der anderen Seite wird das Paraffin RT-58 der Firma Rubitherm verwendet. In Tabelle 1 sind die Stoffeigenschaften von Wasser und Paraffin vergleichend dargelegt.

Eigenschaft	Wasser	RT58
Schmelztemperatur [°C]	0	58
Schmelzenthalpie [kJ/kg]	333,5	178*
Wärmekapazität [J/kg/K]	4187	2100
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	998,2	880
Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]	0,597	0,2

\*sensible Wärme im Temperaturbereich mit integriert

Tabelle 1: Stoffdaten der untersuchten Speichermedien

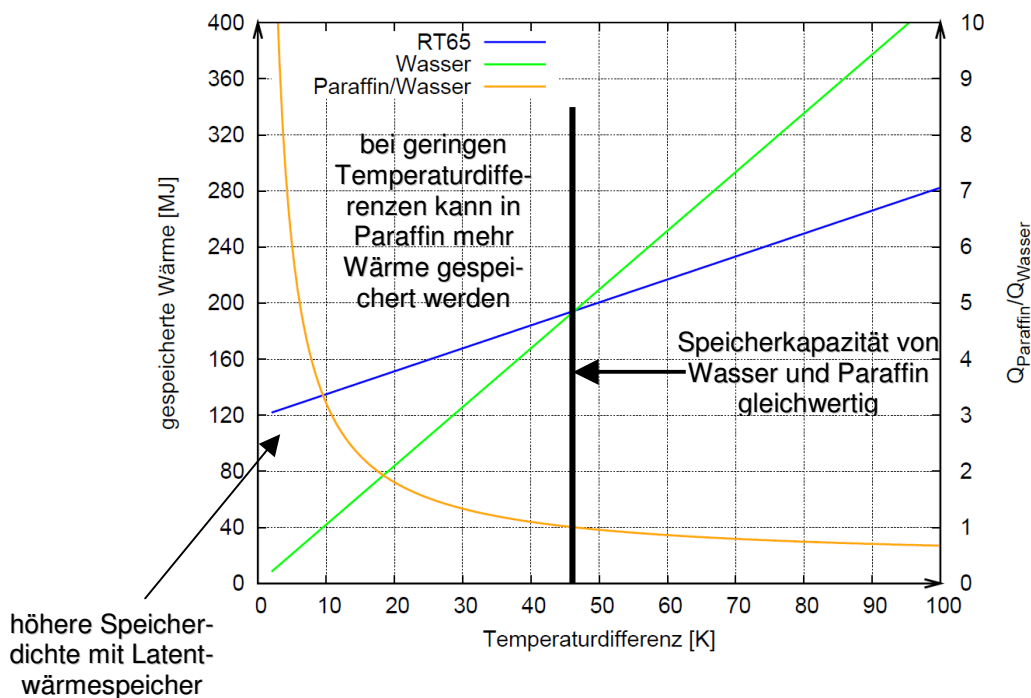


Abbildung 2: Speicherfähigkeit in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz im Vergleich

Werden zwei baugleiche Behälter mit den beiden Speichermedien befüllt und auf eine über den gesamten Behälterinhalt homogen verteilte Temperatur gebracht, so besitzt das Speichermedium die folgende Enthalpiemenge gegenüber der Umgebungstemperatur.

$$\Delta H = m \cdot (c_p \cdot \Delta T + \Delta h_s)$$

Abb. 2 zeigt die Speicherfähigkeit von Wärme für Wasser und Paraffin. Anhand des Diagramms wird deutlich, dass je kleiner die Temperaturdifferenz um einen Betriebspunkt ist, umso vorteilhafter ist dann Paraffin als Wärmespeicher gegenüber Wasser.

Zur Veranschaulichung dieses Vorteils soll folgendes Zahlenbeispiel dienen:

Unter der Annahme eines Speichervolumens von  $V=750$  l (typische Speichergröße für einen Pufferspeicher) und einer Temperaturdifferenz von  $\Delta T=15^\circ\text{C}$  um den Betriebspunkt  $T=58^\circ\text{C}$  (Schmelzpunkt von Paraffin) kann die speicherbare Wärmemenge anhand oben dargestellter Korrelation berechnet werden. Tabelle 2 zeigt für das o.g. Behältervolumen die berechneten Wärmemengen für Wasser und Paraffin (RT58).

Eigenschaft	Wasser	RT58
Volumen [l]	750	750
Masse [kg]	748,7	660
Energiedichte [kJ/kg]	64,26	178
Wärmemenge [kWh]	13,36	32,63

Tabelle 2: Vergleich Wasser- zu Latentwärmespeicher ( $\Delta T=15^\circ\text{C}$ )

Bei gleichem Volumen kann mit Paraffin die 2,44-fache Menge an Wärme gespeichert werden. Bei gleicher Masse steigt dieser Faktor auf einen Wert von 2,77 an. Diese theoretischen Werte lassen sich in der Regel nicht erzielen, da damit vorausgesetzt wird, dass das Paraffin vollständig aufgeschmolzen werden kann. Dies setzt voraus, dass die zugeführte Wärme sehr schnell in das Paraffin eindringen kann. Tab. 1 zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit von Paraffin mit  $\lambda=0,2$  W/m/K sehr niedrig ausfällt. Dieser Nachteil des Paraffins gegenüber Wasser muss durch geeignete metallische Einbauten kompensiert werden. Ein möglicher Ansatz dafür ist die Verbesserung des Wärmeeindringverhaltens durch den Einsatz von Metallschaum oder metallischen Wärmeleitstrukturen.

## 2.3 Metallschaum / metallische Strukturen

### 2.3.1 Metallschaum

Metallschäume sind poröse, aus einem Metall bestehende Materialien. Durch die vielen Poren und den daraus resultierenden hohen Hohlraumanteil besitzen sie eine geringe Dichte, eine hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit. Sie sind als offenporige und geschlossenenporige Metallschäume verfügbar. In Abb. 3 sind drei offenporige Metallschäume mit unterschiedlicher Porendichte dargestellt.

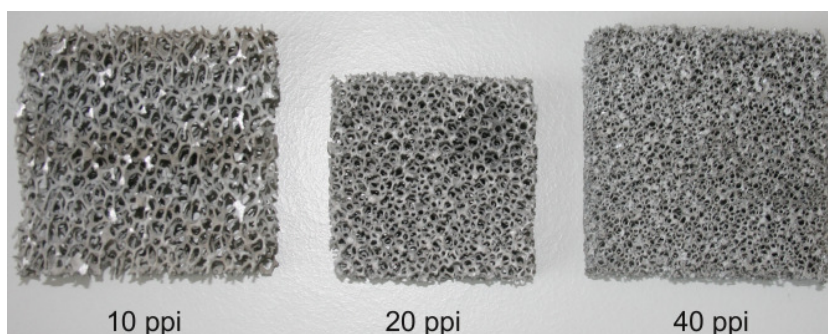


Abbildung 3: Offenporige Metallschäume

Metalle, wie Aluminium oder Kupfer, besitzen eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Durch die Kombination von offenporigem Metallschaum mit Paraffin kann die gute Wärmeleitfähigkeit des Metalls mit der hohen spezifischen Speicherkapazität des Paraffins gekoppelt werden. Dazu wird der Hohlraum des offenporigen Metallschaums mit dem Paraffin befüllt. Die Porendichte wird in der Regel mit der Einheit ppi (pores per inch) beschrieben.

Ein Aluminiummetallschaum mit 10 ppi besitzt eine relative Dichte von ca. 9 % und die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium beträgt in etwa 235 W/m/K. Durch die Kombination von Metallschaum mit Paraffin kann die effektive Wärmeleitfähigkeit des Komposits erhöht werden, wodurch das zeitliche Wärmeindringverhalten verbessert werden kann. Da der Metallschaum nur ca. 9% des Volumens einnimmt wird die Speicherfähigkeit des Komposits nur geringfügig gegenüber reinem Paraffin reduziert, zumal im Metallschaum ebenfalls sensibel Wärme speicherbar ist.

### 2.3.2 Metallstrukturen

Ansätze wie integrierte Metallstrukturen in einer optimierten Anordnung sind ebenso erfolgversprechend wie Metallschaum, wobei insbesondere die geringeren Kosten marktrelevant sind. Damit der Latentwärmespeicher konkurrenzfähig bleibt, soll er in den Kosten mit standardmäßigen Wasserwärmespeichern vergleichbar sein. Daher wurden in diesem Forschungsvorhaben die Metallstrukturen als weitere Option zur Verbesserung des Wärmeübertragungsverhaltens berücksichtigt.

### 2.4 Geometrie

Wenn z.B. ein 750 l Pufferspeicher hinsichtlich der Baugröße für einen Latentwärmespeicher herangezogen wird, stellt sich vorab die grundsätzliche Frage, welche Geometrieform für einen Latentspeicher gewählt werden sollte bzw. inwieweit ein Latentwärmespeicher modular ist, um somit eine gewisse Skalierung des Systems zu ermöglichen.

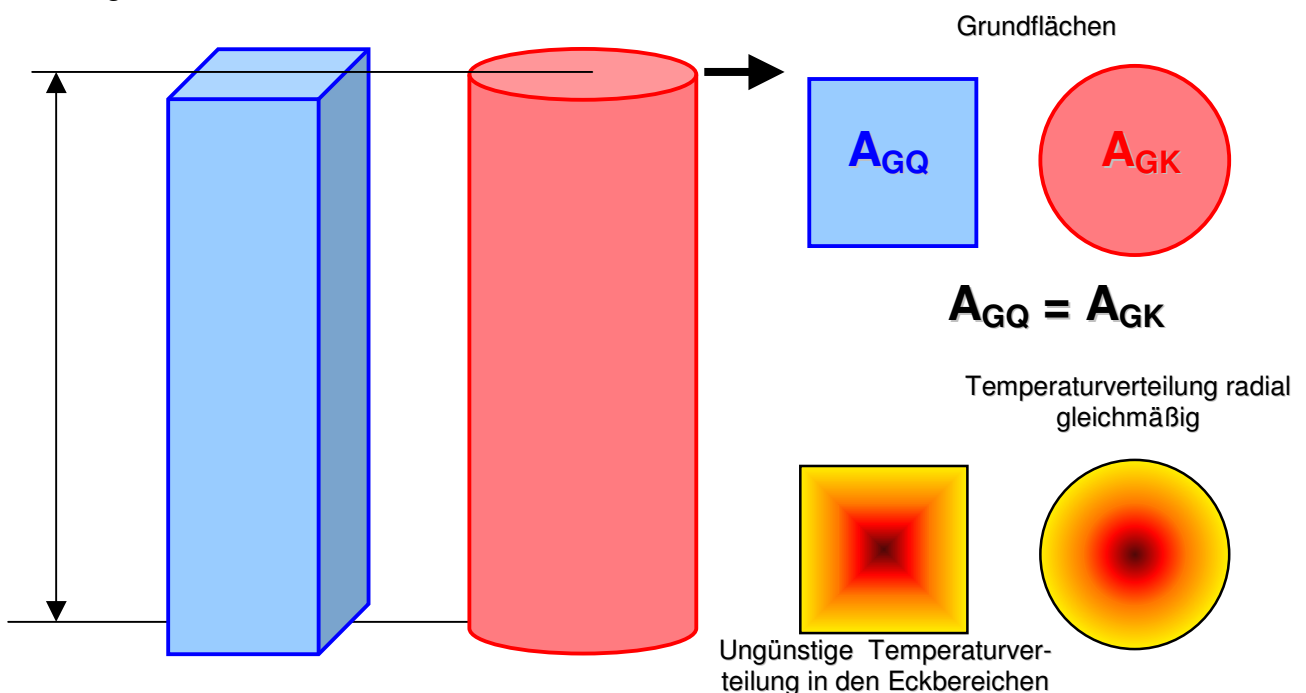


Abbildung 4: Vorüberlegungen zur Geometrieauswahl

Abb. 4 zeigt die erzielbare Temperaturverteilung für die Grundkörper Quader und Zylinder. Bei einer Energiefreisetzung im Inneren des Volumens und einer Wärmesenke im Außenmantel zeigen sich bei einem Rechteckquerschnitt ungünstige Zonen, da die Wärmeleitungswege unterschiedlich lang sind. Im Falle des zylindrischen Querschnittes sind die Wärmeleitwege über den Umfang von innen nach außen gleich lang.

Für die Vorauswahl des Volumens für den Latentspeicher kann aus Tab. 2 der berechnete Faktor zwischen der Speicherkapazität eines Wasserspeichers und eines Latentwärmespeichers herangezogen werden. Bei einem 750 l Warmwasserspeicher können 13,36 kWh an Wärme gespeichert werden. Da Paraffin bei gleichem Volumen ca. die 2,44-fache Menge an Wärme speichern kann, reduziert sich für einen Latentwärmespeicher das Volumen, wenn die Speichermenge mit der von Wasser vergleichbar sein soll. Mit einer einfachen Handrechnung (nämlich  $750 \text{ l} / 2,44 = 307,37 \text{ l}$ ) kann somit das Volumen des Latentwärmespeichers ermittelt werden. Dies beträgt gerundet ca. 300 l. Um eine Skalierbarkeit zu ermöglichen wurde im weiteren Verlauf des Projektes festgelegt, den Gesamtspeicher aus 6 zylindrischen Einzelspeichermodulen mit jeweils ca. 50 l zusammenzusetzen.

## 2.5 Zusammenfassung

Die Voruntersuchungen ergaben, dass Paraffin ein geeignetes PCM für den Latentwärmespeicher darstellt. Dadurch hat der Latentwärmespeicher eine höhere Speicherdichte als Wasser, vorausgesetzt die Betriebsführung erfolgt um den Schmelzpunkt herum bei einer Temperaturdifferenz von ca. 15 °C (hier 50-65 °C). Weiterhin wurde ein Paraffin mit einem Schmelzpunkt von 58 °C gewählt, da damit sichergestellt ist, dass eine Mindestvorlauftemperatur von 55 °C erzielbar ist. Aufgrund der höheren Speicherdichte wird ein Volumen von ca. 300 l für den Speicher benötigt. Zur Erhöhung der Skalierbarkeit wurde festgelegt, dass die Speicher aus Einzelspeichermodulen zusammengesetzt werden sollen. In Tabelle 2 sind die wesentlichen Eckdaten für den geplanten Latentwärmespeicher dargelegt.

Größe	Wert
Volumen Gesamtspeicher [l]	300
Befüllungsvolumen Einzelspeicher [l]	50
Anzahl Einzelspeicher	6
Durchmesser Einzelspeicher [mm]	300
Höhe Einzelspeicher [mm]	800
PCM	Paraffin
Schmelzpunkt [°C]	58
Masse / Einzelspeicher [kg]	44
Speicherkapazität gesamt [kWh]	ca. 13.4
Betriebsbereich [°C]	50-65

Tabelle 3: Ermittelte Eckdaten für den Latentwärmespeicher

Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit der Auslegung des Einzelspeichermoduls hinsichtlich der Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr und der Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit.



### 3 Auslegung des Einzelspeichermoduls

Die Vorstudie hat gezeigt, dass ein Einzelspeichermodul ein Volumen von ca. 50 l aufweisen muss, damit mit insgesamt sechs Einzelspeichervolumen dieselbe Energiemenge wie in einem konventionellen Wasser-Pufferspeicher von 750 l Volumen gespeichert werden kann. Weiterhin wurde deutlich, dass die schlechte Wärmeleitfähigkeit von Paraffin durch metallische Einbauten kompensiert werden muss. Welcher Art die metallischen Strukturen allerdings sein sollen, war zunächst unklar. Zur Klärung wurden experimentelle Untersuchungen (Vorversuche) durchgeführt. Weiterhin werden in diesem Abschnitt zur Verfügung stehende kommerzielle Simulationsmethoden anhand einer Nachrechnung von Versuchen vorgestellt, um diese für die Auslegung eines Einzelspeichermoduls zu qualifizieren.

#### 3.1 Vorversuche

Es wurden experimentelle Vorversuche durchgeführt, um verschiedene metallische Strukturen und deren Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit zu untersuchen. Diese Voruntersuchungen dienen zur Vorauswahl geeigneter Strukturen und werden in den nächsten Abschnitten näher erläutert.

##### 3.1.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Das Wärmespeichermedium (Paraffin bzw. eine Paraffin-Metall-Kombination) wird in einen Zylinder mit einem Innendurchmesser von 150 mm und einer Höhe von 400 mm gefüllt. Der zu befüllende Zylinder besteht aus Aluminium mit einer Wandstärke von 3 mm. Die Mantelfläche des Zylinders wird mit einer Heizmatte umhüllt, die mit Hilfe einer Luftpolsterfolie gegen die Umgebung isoliert wird. Durch einen geeigneten PID-Regler kann die Temperatur an der Aussenhülle eingestellt werden. In Abbildung 5 ist der Aufbau des Versuchstandes dargestellt und wird im Folgenden anhand der markierten Ziffern erläutert.

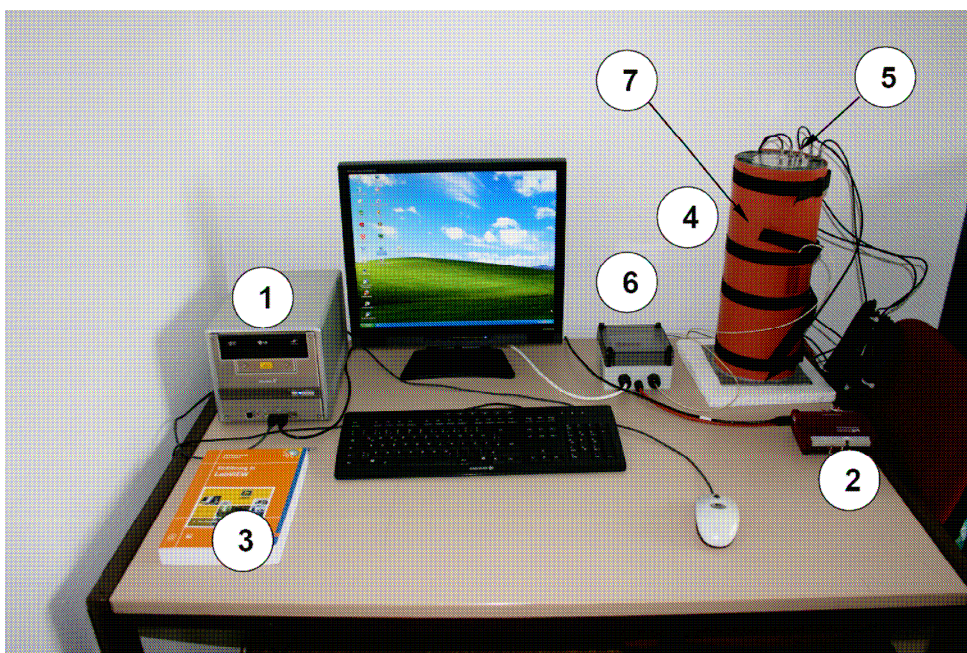


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Erprobung des Einflusses metallischer Strukturen



Für die Durchführung der Versuche wird ein Computer (Ziffer 1) mit geeigneter Software (Ziffer 3) (LabVIEW) zur Messdatenerfassung und -verarbeitung benötigt. Mit Hilfe des Datenloggers (Ziffer 2) werden die während der Versuchsdurchführung erfassten analogen Temperaturmessdaten in digitale Signale gewandelt und über eine USB-Schnittstelle an den Computer bzw. die Messdatenerfassung weitergeleitet. Der Prüfcylinder (Ziffer 7), der das Paraffin bzw. die Paraffin-Metall-Kombination beinhaltet, wird mit einer Heizmatte (Ziffer 4) umwickelt. Mit Hilfe eines PID-Reglers (Ziffer 6) wird die Heizleistung der Heizmatte so geregelt, dass die Wandtemperatur des Zylinders während des gesamten Versuches nahezu konstant bleibt. Die Temperaturmessung (Ziffer 5) erfolgt im Prüfcylinder mit fünf Stabsensoren und auf der Mantelfläche des Zylinders mit einem Flachsensor. Bei den Temperatursensoren handelt es sich um PT-100 Temperaturfühler.

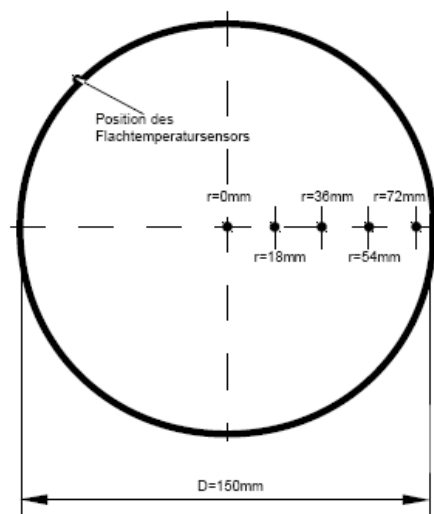


Abbildung 6: Instrumentierungsplan für den Vorversuch

Das Speichermedium (PCM) mit entsprechender metallischer Zusatzfüllung wird in den Zylinder gefüllt. Am Deckel des Zylinders sind die PT-100 Temperaturfühler in den definierten Abständen (siehe Abbildung 6) angebracht. Der Flachsensor misst die Temperatur an der Zylinderwand. Der Zylinder wird mit der Heizmatte, die für eine gleichmäßige Erwärmung des Zylinders sorgt, umwickelt und mit einer Luftpolsterfolie isoliert. Der PID-Temperaturregler wird auf die Versuchstemperatur von  $45\text{ °C}$  eingestellt, so dass die Versuche untereinander vergleichbar sind.

### 3.1.2 Versuchskonfiguration

Mit dem Versuchsstand soll, wie bereits erwähnt, das Wärmeeindringverhalten in Paraffin und in eine Paraffin-Metall-Kombination untersucht werden. Für alle Versuche wird das Paraffin RT31 von Rubitherm verwendet. Die entsprechenden Stoffeigenschaften des Paraffins RT31 sind Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Stoffeigenschaft	Einheit	Wert
Schmelzbereich	[°C]	27-31
Erstarrungsbereich	[°C]	31-27
Schmelzenthalpie	[kJ/kg]	138
Spezifische Wärmekapazität	[J/kg/K]	2100
Volumenausdehnung	[%]	16
Dichte fest	[kg/l]	0,88
Dichte flüssig	[kg/l]	0,76
Wärmeleitfähigkeit	[W/m/K]	0,2
Kinetische Viskosität	[mm <sup>2</sup> /s]	28,57
Flammpunkt	[°C]	174

Tabelle 4: Stoffeigenschaften des Paraffins RT31

Schmelz- und Erstarrungsbereich geben vor, in welcher Temperaturspanne der Phasenwechsel im Paraffin verläuft. Bei diesem Paraffin liegt dieser Temperaturbereich zwischen 27 °C und 31 °C. Zur Verbesserung der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurden unterschiedliche Materialien zusätzlich zum Paraffin in den Versuchszylinder eingebracht.

Tabelle 5 zeigt die untersuchten Kombinationen von Paraffin und Metallstrukturen. Da Metallschaum durch sein aufwendiges Herstellungsverfahren sehr teuer ist, wurden andere, erheblich günstigere Materialien ebenfalls untersucht. Aluminiumwolle und Aluminiumspäne sind Abfallprodukte aus Herstellungsprozessen und somit sehr günstig zu erwerben. Metallschaum existiert als geschlossenporige und offenporige Ausführung. Offenporiger Metallschaum ist vollständig durchströmbar und daher für den Speicher grundsätzlich zur Befüllung günstiger. Abb. 7 zeigt den Versuchszylinder 1 (siehe Tabelle 5) nach der Befüllung mit offenporigem Metallschaum und Paraffin.



Abbildung 7: Versuchszylinder mit Paraffin / offenporigem Metallschaum

Versuchs- zylinder	Zylinder- material	Integr. metallisches Material	Werkstoff	Relative Dichte [%]
1	Alu	Offenporiger Metallschaum	Alu	10
2	Alu	Geschlossenporiger Metall- schaum	Alu	10
3	Kunststoff	Offenporiger Metallschaum	Alu	10
4	Alu	Reines Paraffin	-	-
5	Alu	Aluminiumwolle	Alu	2,22
6	Alu	Aluminiumspäne	Alu	6,6
7	Alu	Aluminiumspäne	Alu	16,75
8	Alu (Igel)	Aluminiumstege	Alu	n.a.

Tabelle 5: Versuchskonfigurationen

### 3.1.3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Für alle Zylinder wurden mehrere identische Versuche durchgeführt um sicherzustellen, dass die Versuche reproduzierbar sind. Daher wurde nach Versuchsdurchführung der jeweilige Probenkörper in einem Klimaschrank wieder auf eine exakte Anfangsbedingung von 10°C abgekühlt. Abb. 8 zeigt die zeitliche Temperaturentwicklung für die einzelnen Versuchszylinder. Während reines Paraffin (Versuch 4) nahezu 250 Minuten benötigt, um 40°C (Mittelwert aus den einzelnen radialen Temperaturmessungen) zu erreichen, wird dies bei den Metallschaumvarianten bereits nach ca. 100 Minuten erreicht.

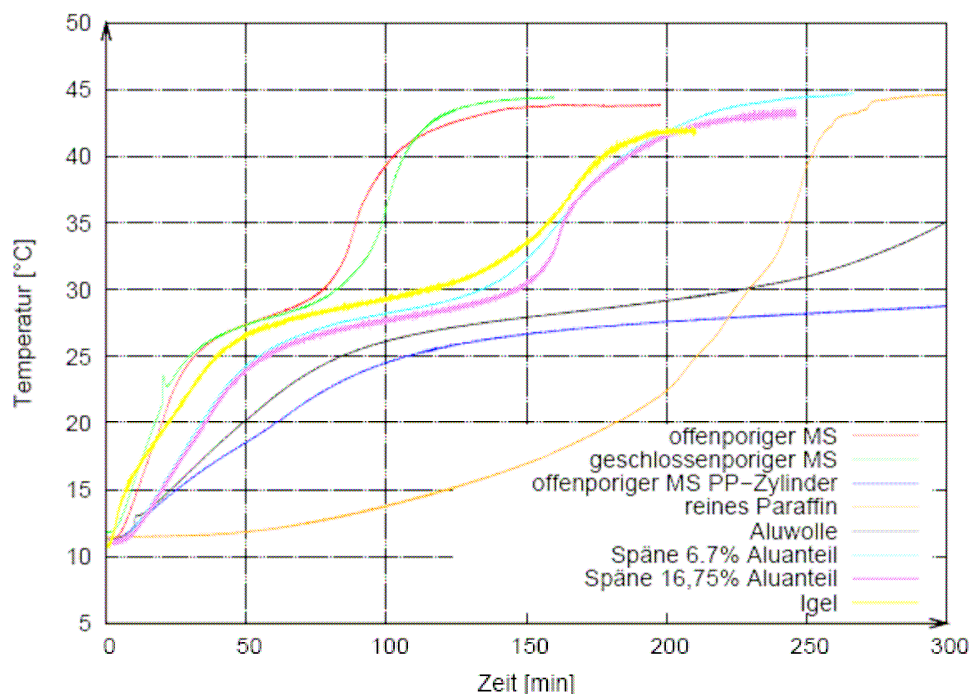


Abbildung 8: Gemessene zeitliche Temperaturverläufe für die verschiedenen Probenkörper

Ein weiteres wesentliches Ergebnis ist, dass die Stegvariante (Versuch 8, Igel) ebenfalls ein gutes Zeitverhalten zeigt. Dieses Ergebnis hat das Projektkonsortium ermutigt die erhebliche günstigere Stegvariante im Projekt weiterzuverfolgen. Die wesentlichen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Reines Paraffin ohne integrierte metallische Strukturen ist im Zeitverhalten sehr langsam und kann somit nicht für ein Einzelspeichermodul zum Einsatz kommen.
- Metallschaum bietet die besten Ergebnisse hinsichtlich des zeitlichen Aufschmelzverhaltens
- Aluspäne und Alustege zeigen ein beachtliches Zeitverhalten im Aufschmelzprozess, wobei die Alustege im Zeitverhalten noch etwas schneller sind.

Das wesentliche Fazit aus den Versuchen ist, dass neben Metallschäumen Metallstege untersucht werden sollten, wobei durch eine Optimierung der Anordnung eine wesentliche Verbesserung erwartet wird.

### 3.2 Validierung Berechnungsverfahren (CFD) durch gezielte Nachrechnung

Bevor das kommerzielle CFD-Tool StarCCM+ für die weiteren notwendigen Auslegungsberechnungen herangezogen werden konnte, wurde gezielt ein Experiment aus den Vorversuchen numerisch nachgebildet. Als repräsentativer Versuch wurde der Versuch mit offenporigen Metallschaum gewählt (Versuch 1). Bei dem Versuch wurde an fünf radial angeordneten Messstellen die Temperatur aufgezeichnet. Diese Messstellen werden zu Vergleichszwecken herangezogen.

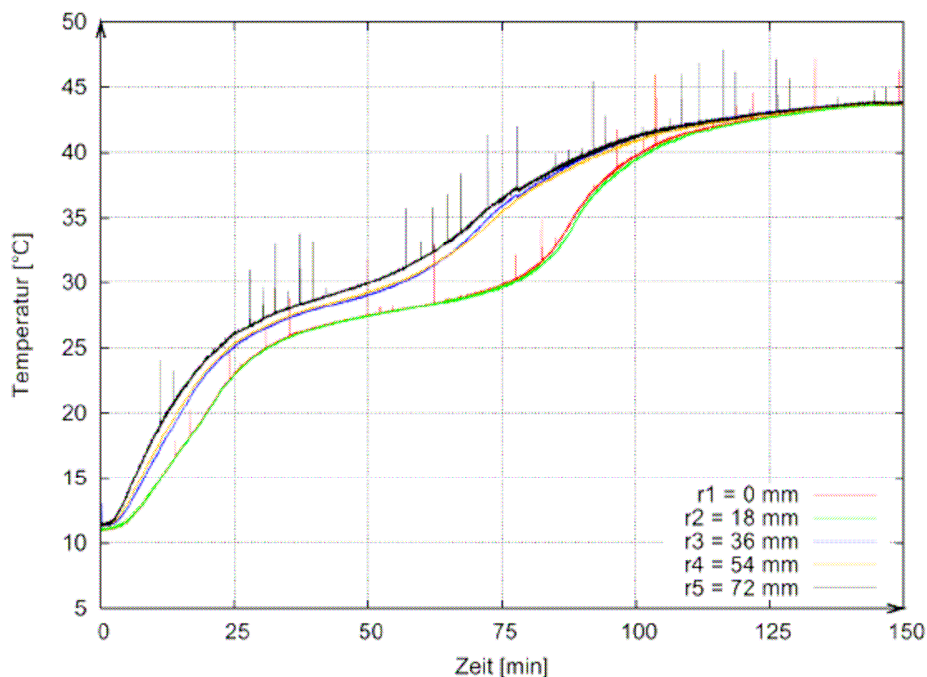


Abbildung 8: Gemessene zeitliche radiale Temperaturverläufe (Versuch 1)

### 3.2.1 Modellbildung

Beim Metallschaum-Modell handelt es sich um ein Mikrostrukturmodell, in dem die Metallstruktur und das umgebende Paraffin modelliert wird. Dadurch kann mit Hilfe des CFD-Solvers StarCCM+ von cd-adapco das Wärmeeindringverhalten eines offenenporigen Metallschaums (10ppi) in Kombination mit Paraffin, wie in Versuch 1 experimentell untersucht, berechnet werden. Dafür wird die Metallschaumstruktur und das umgebende Fluid (Paraffin) aufgelöst. Aufgrund zu hoher Rechenzeiten wurde gezielt nur ein Ausschnitt aus dem Zylinder modelliert (Kuchenstück mit Symmetriebedingungen).

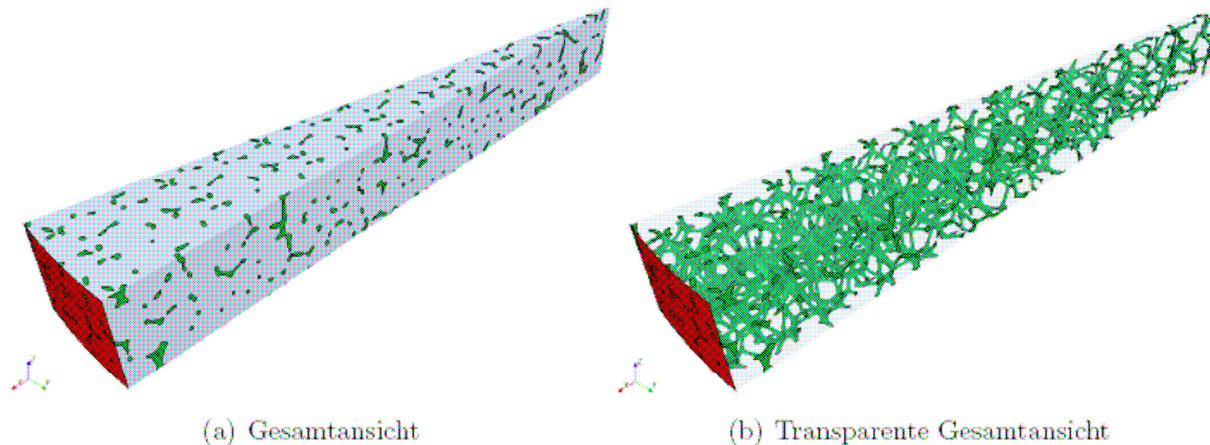


Abbildung 9: Berechnungsmodell mit aufgelöster Metallschaumstruktur

In Abbildung 9 ist das Berechnungsmodell dargestellt. Die rot gekennzeichnete Fläche stellt die Zylinderwand dar. Auf dieser wird eine konstante Temperaturrandbedingung von 45 °C gesetzt. Die Zylinderwandstärke wurde hier nicht abgebildet, um nicht noch mehr Berechnungszellen zu generieren. Dadurch wird das Endergebnis etwas verfälscht, da die Temperaturrandbedingung direkt an den Metallschaumstegen und dem Paraffin anliegt. Bei der rechten Darstellung (b) in Abb. 9 ist die Metallschaumstruktur dargestellt. Diese wird modelltechnisch an das Paraffin durch Interfaces angebunden. Somit können die Wärmetransportvorgänge von Metallstegen zu Paraffin und umgekehrt exakt berechnet werden. Die Berechnung wurde instationär durchgeführt (Realzeit 3 Stunden, analog zur Versuchszeit). Für die Stoffeigenschaften wurden die in Tabelle 4 dargestellten Werte für Paraffin eingesetzt. Die Stoffeigenschaften für Aluminium sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Stoffeigenschaft	Wert
Dichte	2702 [kg/m <sup>3</sup> ]
Wärmekapazität	903 [J/kg/K]
Wärmeleitfähigkeit	237 [W/m/K]

Tabelle 5: Stoffeigenschaften von Aluminium

### 3.2.2 Berechnungsergebnisse

In Abb. 10 sind an der Stelle  $r=18$  mm die zeitlichen Temperaturverläufe von Messung und Berechnung dargestellt. Die Übereinstimmung an dieser Stelle ist sehr gut. Die mit einem Ersatzmodell erzielten Ergebnisse (anstatt eines Mikrostrukturmodells) passen weniger gut. Dies ist auf das in StarCCM+ implementierte Phasenwechselmodul zurückzuführen, das im Falle von homogenen eingesetzten stofflichen Ersatzgrößen die Phasenfront nicht realitätsnah beschreiben kann.

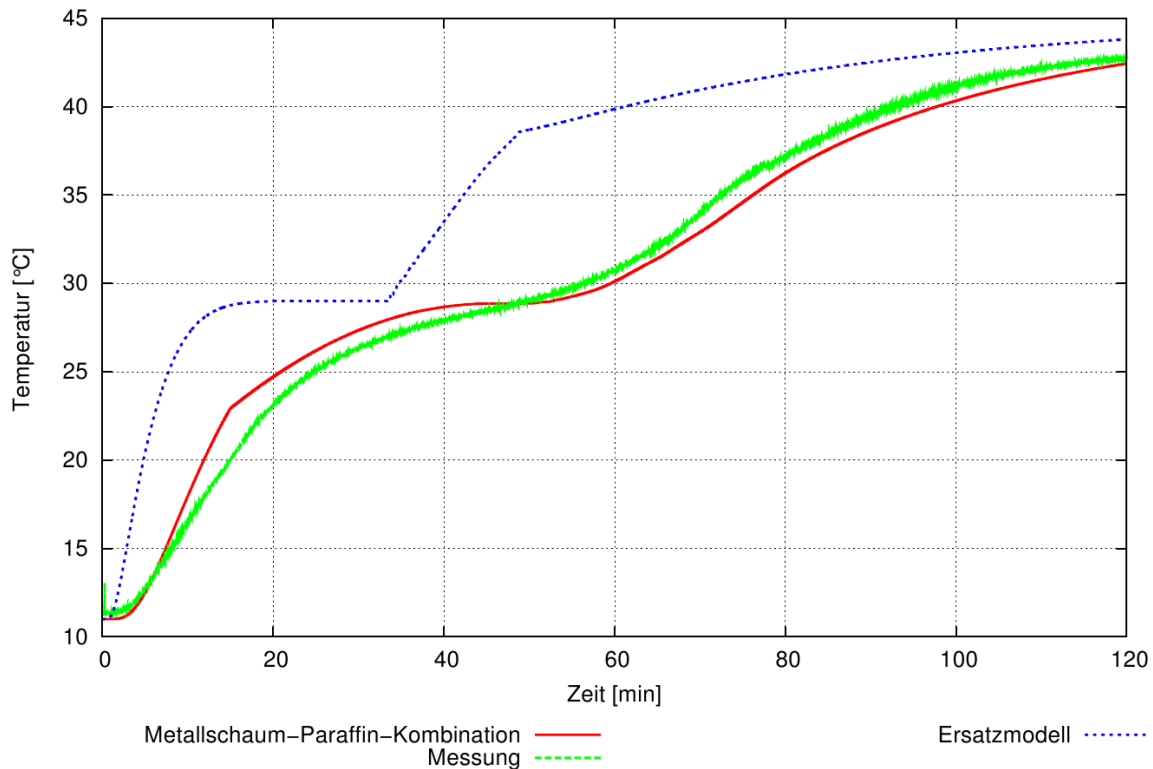


Abbildung 10: Vergleich Berechnung Messung

Insgesamt konnte anhand dieser Nachrechnung bewiesen werden, dass das kommerzielle CFD-Verfahren bei geeigneter Auflösung der Strukturen die Realität gut widerspiegelt. Somit kann das Rechenverfahren für weitere Auslegungsrechnungen eingesetzt werden. Die Ergebnisse der Auslegungsrechnungen werden im nächsten Abschnitt erläutert.

### 3.3 Vorauslegung durch Virtual Prototyping

Die Versuchsergebnisse wie auch die Berechnungen zeigen, dass Metallschaum ohne Frage ein geeignetes, wenn auch teures Material für den Einsatz in einem Latentspeicher darstellt. Aus Kostengründen allerdings ist es sinnvoll Alternativen, wie experimentell bereits angedacht, zu überprüfen. Hierzu wurden gezielt numerische Berechnungen durchgeführt, um zu einer Auslegung des Einzelspeichermoduls zu gelangen.



### 3.3.1 Einleitung zur Modellbildung

Wärmetransportprozesse, wie Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung, werden von vielen Faktoren beeinflusst. Im Bezug auf das Wärmeindringverhalten in das Paraffin ist die Wärmeleitung und zeitliche Wärmespeicherung ausschlaggebend. Die Geschwindigkeit der Wärmeübertragung hängt von der Metallrippenstärke und der Anbindung an die Wärmesenke oder -quelle ab. Um eine geeignete Konstruktionsvariante zu finden, wurden fünf Varianten hinsichtlich des zeitlichen Wärmetransportes numerisch untersucht. In der numerischen Simulation wird ausschließlich das Wärmeindringverhalten in das Paraffin qualitativ ausgewertet. Aus diesem Grund werden Vereinfachungen getroffen, um die Berechnungszeit zu reduzieren. Im Folgenden sind die vorgenommenen Vereinfachungen aufgeführt (siehe auch Abb. 11).

- Modellierung eines Vertikalsegments zur Reduzierung der Berechnungszeit
- Simulation des Abkühl- und Erstarrungsvorganges
- Vernachlässigung der Zylinderwandstärke
- keine Modellierung der Rohrwendelwandstärke und des Strömungsfluids in der Rohrwendel

Eine numerische Strömungssimulation (engl.: Computational Fluid Dynamics - CFD) ermöglicht die Simulation komplexer physikalischer Probleme und basiert auf dem Lösen von Erhaltungsgleichungen. Strömungsmechanische Probleme werden approximativ mit numerischen Methoden gelöst. Die häufig dafür genutzten Modellregeln sind die Navier-Stokes-Gleichungen, die Euler-Gleichungen und die Potentialgleichungen.

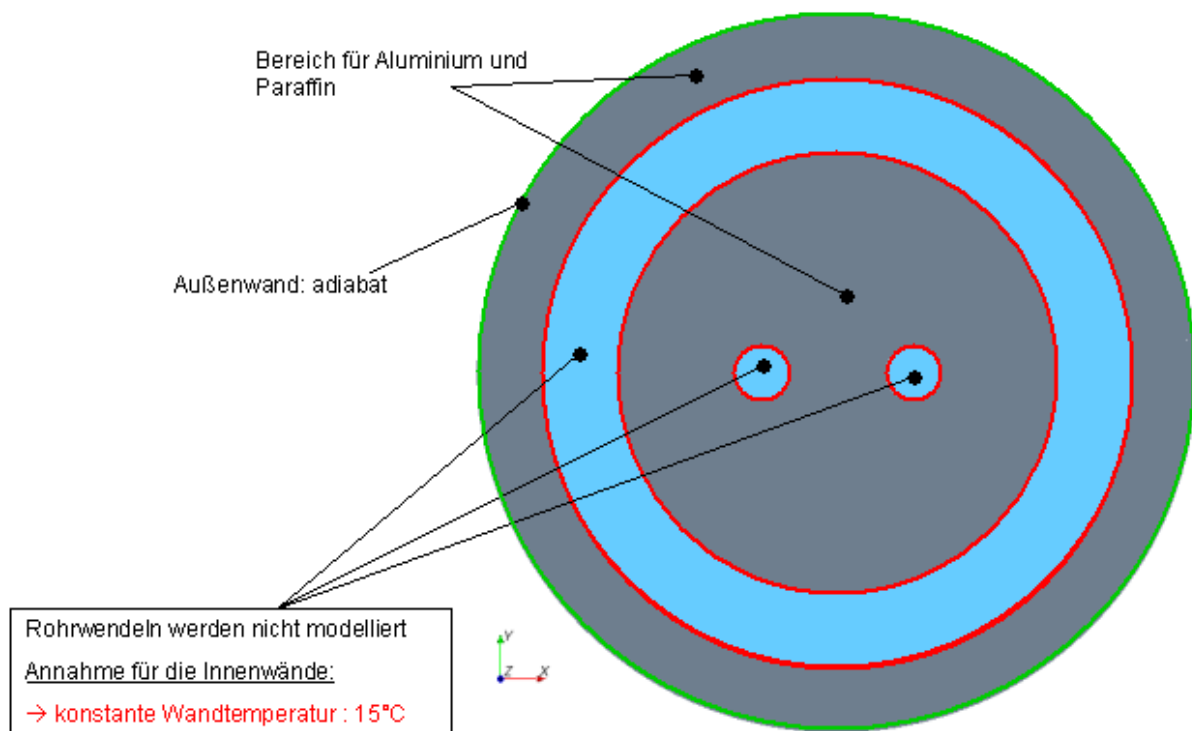


Abbildung 11: Modellannahmen, Randbedingungen für die Auslegungsrechnungen

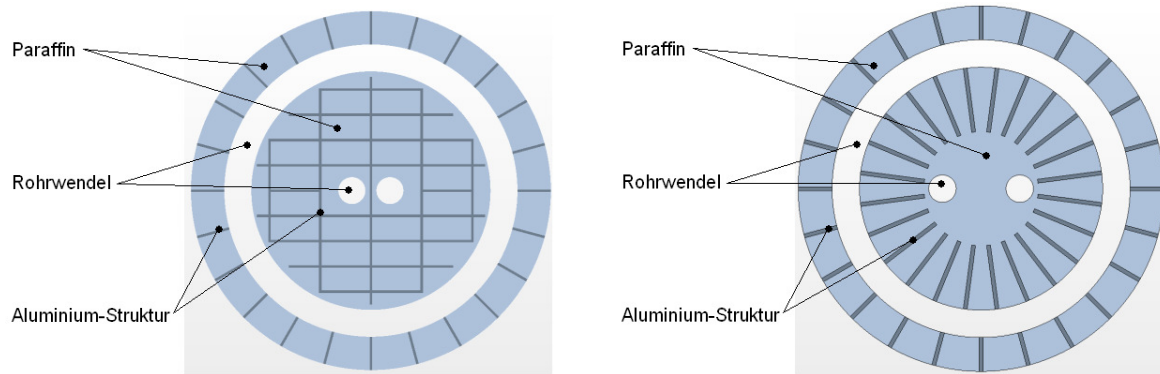


Abbildung 12: Varianten für die Untersuchung

### 3.3.2 Geometrievarianten

In Abb. 12 sind beispielhaft Geometrievarianten dargestellt, die numerisch hinsichtlich des zeitliche Wärmetransportverhaltens untersucht wurden. Die modellierten Stege haben das Ziel die Wärme schneller in das Paraffin zu transportieren und somit dessen schlechte Wärmeleitfähigkeit zu kompensieren. Die Materialdaten sind gemäß den in Tabelle 3 und 5 dargestellten Stoffeigenschaften für Paraffin und Aluminium definiert. Insgesamt wurden fünf Geometrievarianten mehrfach numerisch berechnet, wobei anhand des Vergleichs des berechneten zeitlichen Temperaturverlaufs an definierten Monitoringstellen eine geeignete Variante ermittelt werden konnte.

#### 3.3.3 Berechnungsmodell

Für die numerische Berechnung werden Berechnungsmodelle benötigt, die auf einer Diskretisierung (Netzgenerierung) des Rechengebietes basieren. Die Netzgenerierung der Geometriemodelle erfolgte mit Hilfe des Pre-Processors MSC Patran. MSC Patran ermöglicht eine strukturierte Vernetzung mit Hexaeder-Zellen (Quader mit 8 Knoten). Neben strukturierten Berechnungsgittern besteht auch die Möglichkeit der Generierung unstrukturierter Netze. Unstrukturierte Gitter setzen sich meist aus Tetraeder-Zellen zusammen. Die Generierung erfolgt meist vollautomatisch und ist mit den meisten kommerziellen CFD-Codes möglich. Für die durchgeführten Berechnungen wurde ein strukturiertes Berechnungsgitter erstellt. In Abbildung 13 ist ein Ausschnitt des Berechnungsgitters für die Geometrievariante 2 dargestellt. Die Aluminiumstruktur ist über die Stegdicke feiner aufgelöst, als der Fluidraum (Paraffin).

Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt aus dem Berechnungsgitter der Geometrievariante 4. Hier ist sowohl der Strukturraum (Aluminiumstege) als auch der Fluidraum feiner vernetzt. Rundungen, wie sie bei Variante 4 vorhanden sind, benötigen grundsätzlich ein feineres Berechnungsgitter, um die Rundungsradien auflösen zu können.



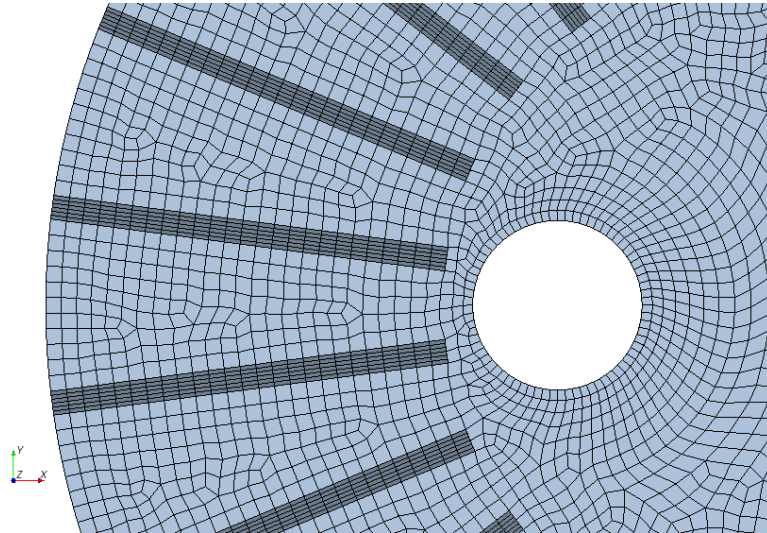


Abbildung 13: Erstelltes Berechnungsgitter für Variante 2

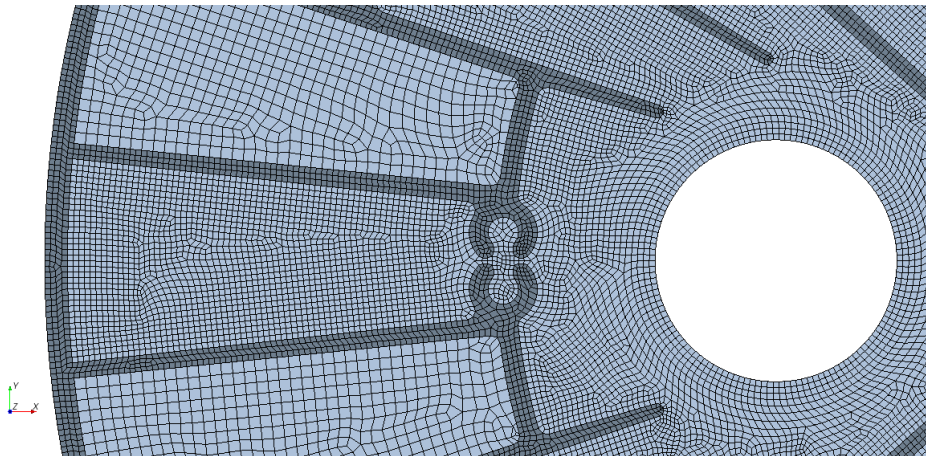


Abbildung 14: Erstelltes Berechnungsgitter für Variante 4

Die Berechnungsgitter der einzelnen Varianten unterscheiden sich aufgrund der geometrisch unterschiedlich ausgeprägten Details sehr in der Elementanzahl. Im folgenden ist die Elementanzahl für jede Variante aufgeführt.

- Variante 1: 139672 Elemente
- Variante 2: 69556 Elemente
- Variante 3: 143984 Elemente
- Variante 4: 467668 Elemente
- Variante 5: 196060 Elemente

Unter Pre-Processing ist die Vorbereitung eines Berechnungsmodells für die numerische Berechnung zu verstehen. Dabei erfolgt die Definition von Regionen, Randbedingungen und Umgebungsvariablen und die Festlegung der Domains. Jeder Domain kann ein Materialtyp (Fluid, Struktur, Gas) und die entsprechenden Materialeigenschaften zugewiesen werden. Für jede Domain im Berechnungsmodell werden dann die zugewiesenen Erhaltungsgleichungen gelöst. Bei einem Fluid sind diese typischerweise die Massenerhaltung, die Impulserhaltung und die Energieerhaltung. Im Falle einer turbulenten Strömung kann zusätzlich ein Turbulenzmodell aktiviert werden. Bei einer Struktur wird nur die Energieerhaltung gelöst.

Jede Variante besteht aus zwei Berechnungsdomains. Eine Struktur-Domain für die Metallstruktur und eine Fluid-Domain als Multiphase-Mixture für das Paraffin. Jeder Domain werden die entsprechenden Materialeigenschaften zugewiesen. Als Struktur wird Aluminium und als Fluid das Paraffin RT58 der Firma Rubitherm verwendet. In Tabelle 3 und 5 sind die Stoffeigenschaften, die verwendet wurden, aufgeführt. Für die Fluid-Domain müssen zusätzliche Modelle des Solvers neben den Erhaltungsgleichungen ausgewählt werden. Bei diesen Modellen handelt es sich um Melting-Solidifikation und Volume of Fluid - VOF. Dadurch ist es möglich die Schmelztemperatur, die in diesem Fall gleich der Erstarrungstemperatur ist, einzutragen. Mit Hilfe dieser Modelle wird der Erstarrungsprozess abgebildet. Für die Strukturdomain wird lediglich die Energiegleichung gelöst.

Da die Rohrwendel zur Wärmezufuhr bzw. Abfuhr nicht abgebildet wurde, werden hierfür keine Randbedingungen und auch keine Stoffeigenschaften für ein Fluid (z.B. Wasser) benötigt. Die festgelegten Randbedingungen sind in Abbildung 11 veranschaulicht. Die Zylinderaußenwand wird als adiabat angenommen, d.h. optimal isoliert, so dass keine Wärmeverluste über die Außenwand auftreten. Die Wandflächen der Rohrwendel bekommen eine konstante Temperatur von 15 °C. Alle Berechnungsfälle (unterschiedliche Varianten) werden aus Vergleichsgründen mit denselben Randbedingungen versehen. Als Anfangsbedingungen wird die Temperatur bei  $t = 0$  s beider Berechnungsdomains auf  $T_0 = 70$  °C gesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass der Speicher zu diesem Zeitpunkt voll beladen ist.

### 3.3.4 Berechnungsergebnisse

Für die Auswertung der Berechnungsergebnisse wurden Konturplots der Temperatur auf einer Ebene, die das Vertikalsegment schneidet, zu unterschiedlichen Zeitpunkten erstellt. Darüber hinaus wurde die Temperatur radial zu jedem Zeitpunkt an fünf Punkten T1 bis T5 im Paraffin ausgewertet. Die Lage der Temperaturmesspunkte ist ja nach Variante sehr nah bei der Metallstruktur.

In den Abbildungen 15 und 16 ist die Temperaturverteilung in einem Schnitt quer durch das Vertikalsegment der verschiedenen Varianten nach 20 Minuten und nach 60 Minuten dargestellt. Deutlich sind die Unterschiede im Bezug auf das Wärmeeindringverhalten zwischen den einzelnen Varianten zu erkennen. Nach 20 Minuten liegt im innenliegenden Zylinderbereich im Paraffin als auch in der Metallstruktur eine Temperatur von 70 °C vor. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich im Bereich zwischen der Zylinderwand und der Rohrwendel. Die Aluminiumstege haben sich bereits nach 20 Minuten auf 15 °C abgekühlt, wodurch die Temperatur im Paraffin bereits im Schmelztemperaturbereich liegt. Nach 60 Minuten (Abbildung 14) liegt die Tempera-

tur im Bereich zwischen Rohrwendel und Zylinderwand schon unter 25 °C. Die Wärme wird nur sehr unzureichend durch das Rechteckmuster verteilt.

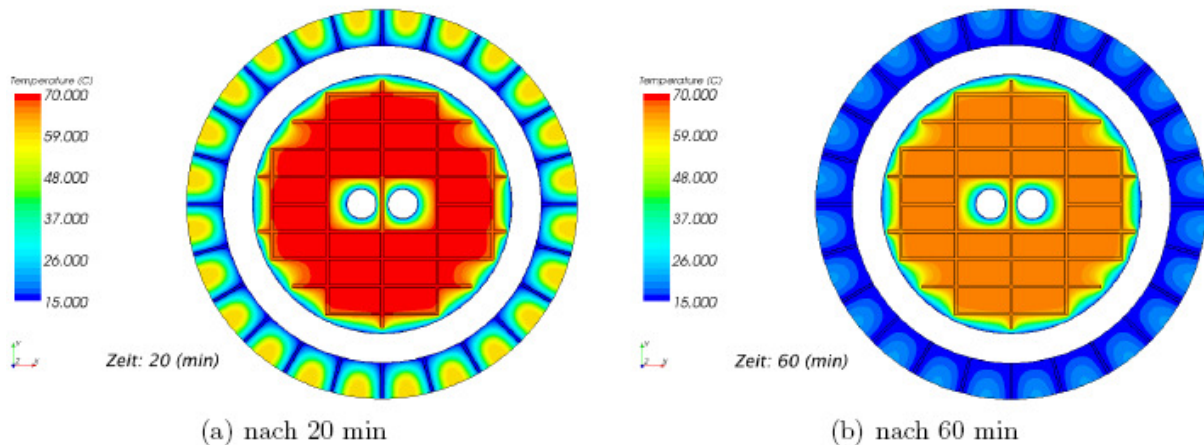


Abbildung 15: Berechnete räumliche Temperaturverteilung (Variante 1)

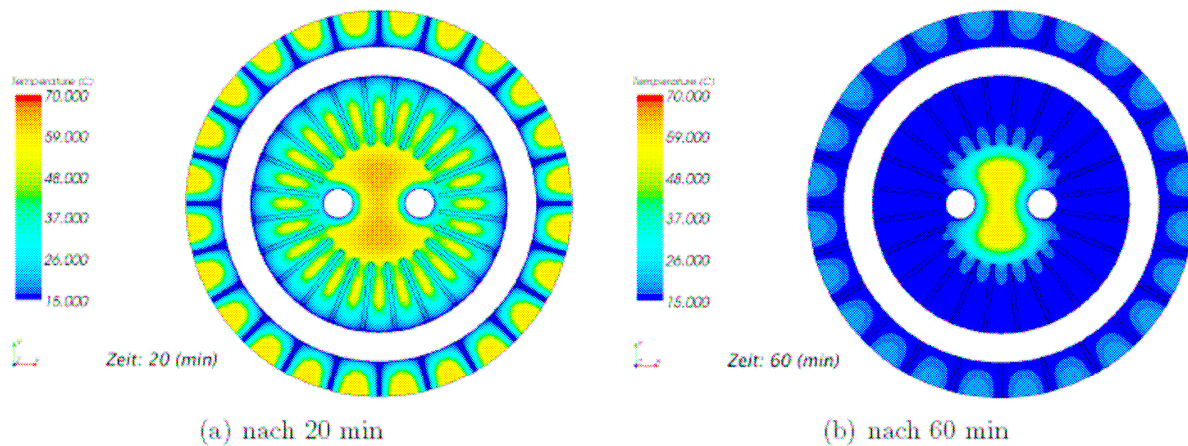


Abbildung 16: Berechnete räumliche Temperaturverteilung (Variante 2)

Darüber hinaus lässt sich die schlechte Wärmeleitung in das Zylinderzentrum auf die fehlenden Kontaktflächen zwischen Rohrwendel und Metallstruktur zurückführen. In Abbildung 16 ist die Temperaturverteilung nach 20 und nach 60 Minuten der Variante 2 dargestellt. Deutlich ist eine Verbesserung des Wärmeeindringverhaltens im Vergleich zu Variante 1 zu erkennen. Die Anordnung der Aluminiumstege in Anlehnung an die Zylinderkoordinaten wurde bewusst gewählt, um einen möglichen Unterschied zwischen den beiden Ausführung zu erhalten. Die Anordnung der Metallstruktur zwischen Zylindermantel und Rohrwendel ist dieselbe wie bei Variante 1. Darüber hinaus besteht ein Kontakt zwischen der inneren Aluminiumstruktur und der äußeren Rohrwendel. Nach 20 Minuten (Abbildung 16) hat das Paraffin bereits den Schmelztemperaturbereich erreicht bzw. überschritten. Lediglich im Zylinderzentrum hat das Paraffin eine Temperatur von ca. 64 °C. Nach 60 Minuten ist deutlich zu erkennen, dass sich das Paraffin im mittleren Bereich des Zylinders bereits auf 15 °C abgekühlt hat. Dies ist auf die Aluminiumstege, die die Wärme ins Zylinderzentrum leiten, zurückzuführen. Da in der Mitte des Zylinders keine Metallstruktur vorhanden ist, kühlt sich das Paraffin hier auch deutlich langsamer ab.

Die Temperaturentwicklung im Paraffin zeigt beim Betrachten der volumetrisch gemittelten Temperatur im Paraffin (für alle Varianten), dass die Schmelztemperatur bereits nach 10 Minuten unterschritten wird. In Abbildung 17 ist der Verlauf der volumetrisch mittleren Temperatur des Paraffins dargestellt. Zur Orientierung ist auch der Schmelztemperaturbereich, der bei 58 °C liegt, mit in das Diagramm aufgetragen. Wird ein Betriebsbereich für die ersten 15 bis 20 Minuten definiert, in dem die meiste Energie aus dem Speicher entzogen bzw. ihm zugeführt werden soll, darf hier die Temperatur im Paraffin nicht um mehr als 7 K vom Schmelztemperaturbereich abweichen. Unter diesem Gesichtspunkt erfüllen alle fünf Varianten in dieser Darstellung des Temperaturverlaufs die Bedingung. Anhand des Diagramms zeigt sich, dass das Paraffin in Variante 1 am langsamsten abkühlt. Nach 80 Minuten liegt die Temperatur des Paraffins aus Variante 5 bereits bei 15 °C. Die Temperatur des Paraffin von Variante 2 hat nach 140 Minuten die Wandtemperatur der Rohrwendeln erreicht. Bei den anderen Varianten ist auch nach 180 Minuten noch nicht das gesamte Paraffin komplett abgekühlt.

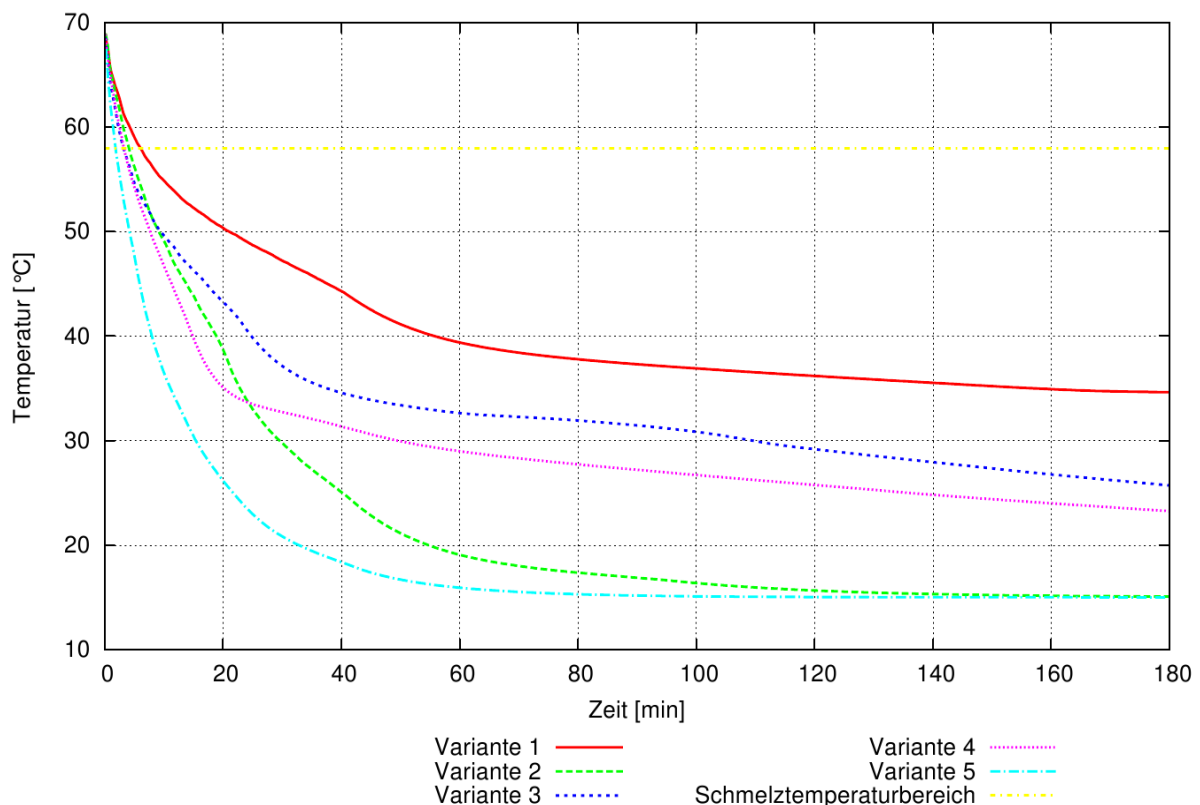


Abbildung 17: Berechnete zeitliche Temperaturentwicklung im Paraffin für die verschiedenen Varianten

Die besten Ergebnisse im Bezug auf den Wärmeeintrag zeigt Variante 5 mit den Blechteilen. Durch die U-Bögen, die für eine gleichmäßige Verteilung der Metallstruktur sorgen, und einen ausreichenden Kontakt zu den Rohrwendeln stellt sich hier eine relativ gleichmäßige Wärmeverteilung, sowie ein sehr gutes Wärmeeindringverhalten ein. Folglich lässt sich eine optimale Wärmeleitung ins Zylinderzentrum erzielen, wenn



- die Stegführung an das Zylinderkoordinatensystem angelehnt ist
- die Rohrwendeln mit der Rippenstruktur ausreichend Kontakt haben
- die Rippenstruktur eine ausreichende Dicke der Stege besitzt.

### 3.3.5 Resultierendes Design als Ausgangsbasis für die Konstruktion

Aus der Gegenüberstellung der verschiedenen Rippenstrukturverteilungen zur schnellen Wärmeübertragung in das Paraffin ging hervor, dass die Rippen möglichst homogen verteilt sein müssen, die Stegführung an das Zylinderkoordinatensystem angelehnt sein muss und die Struktur eine ausreichende Stegdicke besitzen sollte. Da Variante 5 die besten Ergebnisse erzielt hat und alle nötigen Anforderungen erfüllt sind, wurde das resultierende Design daran angepasst. Die Umsetzung der Ausgangsbasis für die Konstruktion erfolgt mit Steckverbindungen, die als Bleche mit der Dicke von 3 mm konstruiert wurden. Die Bleichteile konnten als lasergeschnittene Blechbiegeteile umgesetzt werden. In Abbildung 18 ist das resultierende Design dargestellt. Ein grundsätzliches Problem stellt die Realisierung einer ausreichenden Kontaktfläche zwischen Rohrwendel und Metallstruktur dar. Bei einer reinen Steckverbindung würde sich im optimalen Fall ein Linienkontakt an den Kontaktstellen ergeben. Diese Anbindung von Rippen-Blech innen zur Rohrwendel und von Rippen-Blech außen muss für eine sehr gute Wärmeübertragung stoßschlüssig sein.

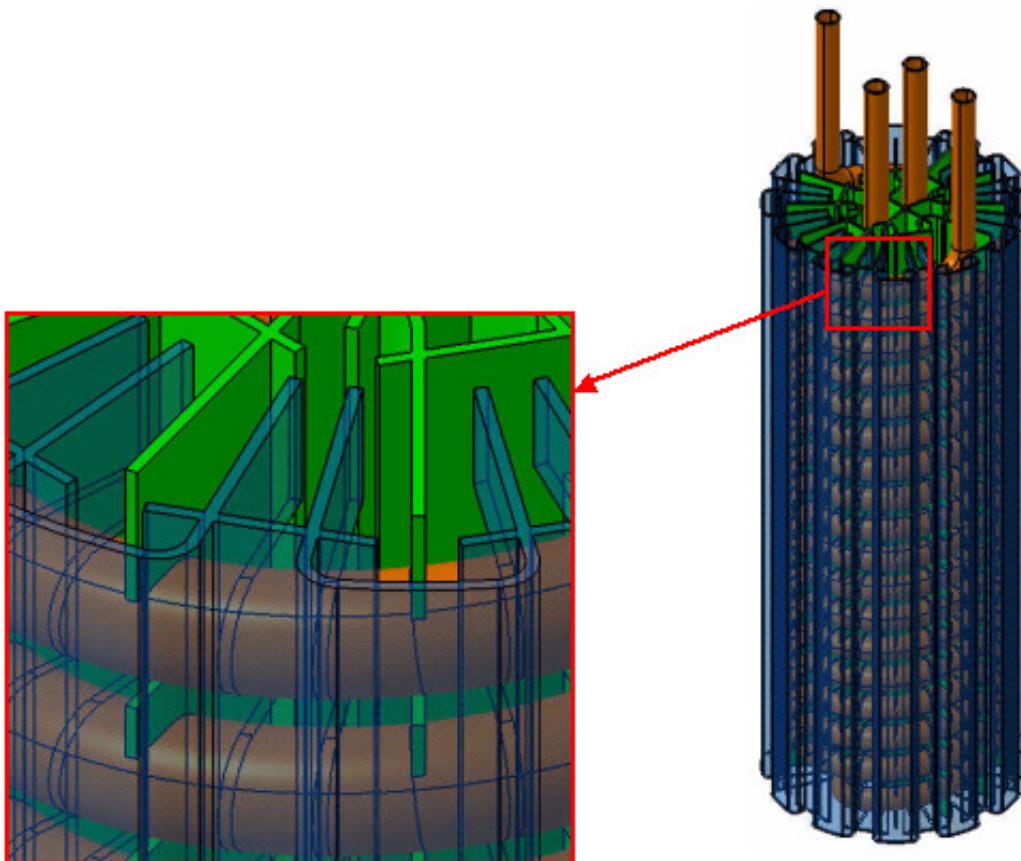


Abbildung 18: Aus numerischer Studie abgeleitetes Urdesign für das Einzelspeichermodule

## 4 Konstruktion des Latentwärmespeichers

### 4.1 Konzeptfindung

Der zu entwickelnde Latentwärmespeicher soll gemäß des Projektplanes als Demonstrator ausgeführt werden, um somit das Speicherkonzept experimentell untersuchen zu können und damit dieser gleichzeitig als Vorführgerät für vertriebliche Aktivitäten genutzt werden kann.

Der Demonstrator mit seiner Gesamtfunktion als Wärmespeicher wurde in Teilfunktionsbereiche strukturiert. Die einzelnen Teilfunktionsbereiche wurden unter Berücksichtigung der Gesamtfunktion und der Schnittstellen so konzipiert, dass auf Basis des Anforderungsprofils (siehe Abschnitt 2) der Bau des Demonstrators möglich ist.

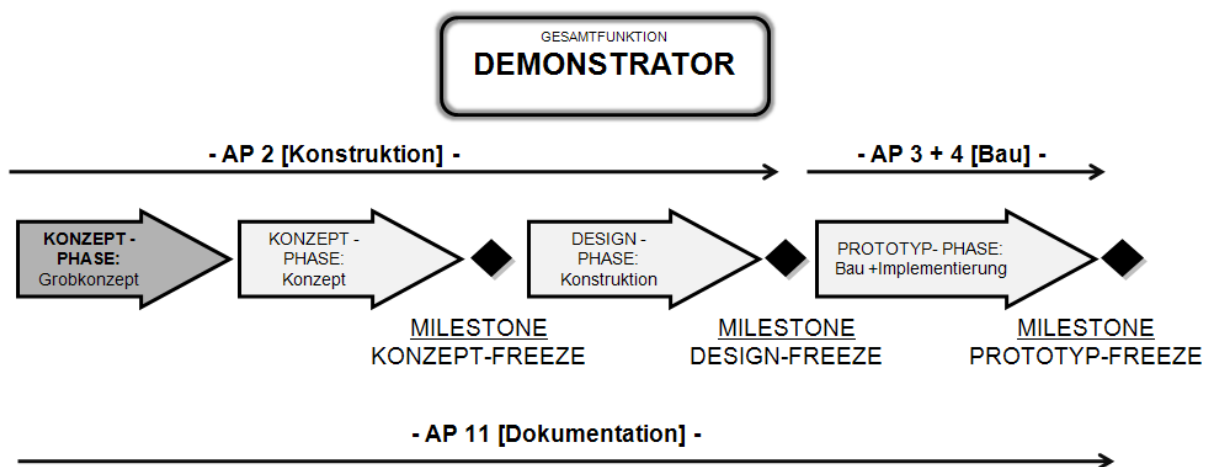


Abbildung 19: Funktionsbereichsstruktur

Bei der Untersuchung der einzelnen Bereiche wurden durch Recherchen, Informationen über aktuelle am Energie- und Heizmarkt käufliche Produkte zur Speicherung von Energie und deren späterer Nutzung eingeholt. Hierzu dienten Gespräche mit Installationsfirmen, Spezialisten und Fachleuten sowie Informationsquellen von marktführenden Firmen wie beispielsweise Weishaupt, Buderus, Ebner, Siemens, oder Viessmann. Folgende stichwortartig aufgeführten Informationen wurden ausgewertet und in Bezug auf die Konstruktion analysiert:

- Informationen über Speichervolumen, dessen Raumbedarf, die benötigte Aufstellfläche bei entsprechender Speichermenge (300l, 500l, 1000l bis 3000l) sowie deren Leistung in kW.
- Informationen über Transport-, Handhabungs- und Liefergewichte vorhandener Speicher auf dem Markt.
- Installationshindernisse wie Türen, Treppen, Aufzüge und Maß- und Gewichtseinschränkungen, Heizraumtüren DIN 4102, DIN EN 1634 und Rauchschutz DIN 18095 z.B. T30-1 H8-5.
- Reduzierung von Energieverlusten durch Isolation.

- Gestaltung der Form und Auslegung für optimierte, anwenderfreundliche und preisgünstige Herstellverfahren gemäß definierter Sicherheitsbestimmungen.
- Kostenbewertungen, Kalkulationseinschätzungen.
- Zuverlässigkeitsbetrachtungen, Lebensdauer und Minimierung des Serviceaufwandes.
- Herstellungsenergie, Betrachtungen und Analysen und deren Bewertung.
- Umwelteinflussbetrachtung und Bewertung der Materialbelastungseinstufung.
- Schadstoffvermeidung und Reduzierungspotential.

Auf Basis dieser Erkenntnisse und in Abstimmung mit dem Anforderungsprofil wurde der Demonstrator von Grund auf konzipiert. Wichtig war in dieser Arbeit auch die enge Zusammenarbeit im Konsortium. In den regelmäßigen Meetings wurden die Konzepte untereinander diskutiert und abgestimmt, so dass jeder seinen Standpunkt aus Sicht seines Arbeitspaketes einbringen konnte. Der Abschluss der Konzept-Phase wurde durch einen Meilenstein KONZEPT-FREEZE gelegt. Im Folgenden wird nun auf die einzelnen Konzepte der Teilfunktionsbereiche eingegangen.

## **4.2 Gesamtfunktion**

### **4.2.1 Speichermodul**

Für die Speichermodulauslegung bekam die engtec von der Tinnit GmbH neben der Anforderungsliste ein geometrisches, dreidimensionales CAD Ur-Modell, an welchen sich die Konzeptbildung für einen Prototyp orientierte. Das Modell hatte folgende geometrische Abmessungen:

- Zylinderhöhe 750mm
- Zylinderdurchmesser 294mm
- Innenverrippung / Zwischenverrippung
- Rohrwendel Innendurchmesser 231,6mm
- Rohr-Innendurchmesser = 21,6mm
- Rohr-Aussendurchmesser = 26,90mm
- Zwei Spiralen um 180° versetzt ineinander
- Zwei Mittelstützen laufen in der Spirale nach oben
- Einlauf und Auslauf oben auf einer Seite (oben)

Dieses Ur-Modell hatte zwei entscheidende Merkmale. Zum einen sollten zwei Kreisläufe zur Energiespeicherung und Energieentnahme verbaut werden, zum anderen soll die Rippengeometrie von 3-4 mm ringförmigen Kontakt zur Innen- und Außenfläche der Spirale halten. Das Basismaterial besteht aus einer sehr gut wärmeleitenden Aluminiumlegierung. Die verbleibenden Hohlräume waren zur Befüllung mit Metallschaum angedacht. Grundsätzliche Aufgabe bestand nun darin eine fertigmachbare ähnlich gestaltete Struktur zu entwerfen, welche dann auch aus Montagesicht leicht verbaubar ist. Für den Innenaufbau wurden folgende Konzepte verfolgt:

- Rohrwendel in Metallschaum
- Strangprofil
- Blechsteckkonzept (Lase-/Stanzteile)
- Gusskonzept

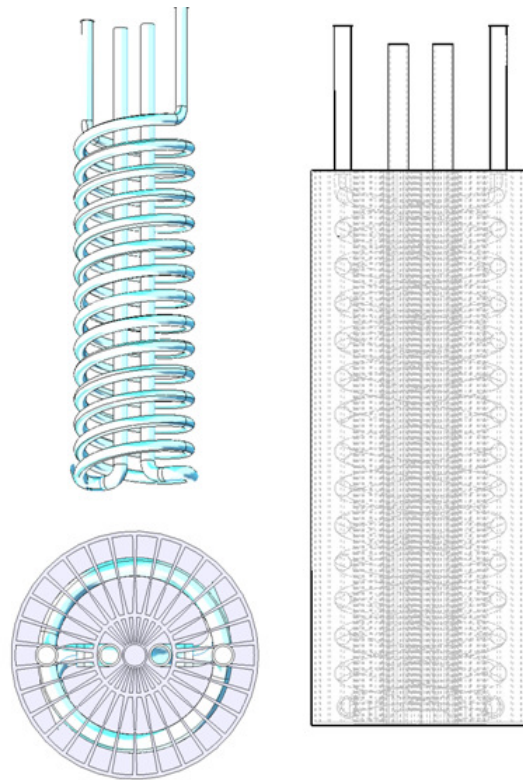


Abbildung 20: Geometrisches Ur-Modell mit integrierter Rohrwendel

Durch eine Grobkalkulation, welche auf Erfahrungswerten sowie auf Lieferantenfeedback basierte, wurde folgender grober Kostenvergleich für einen Prototypen erstellt:

<u>K1-AI-Strangprofile</u>		<u>K2-Laser-/ Stanzteile</u>		<u>K3-AI-Standard Strangprofile</u>	
WKZ:	ca. 8000 €	Programmkosten	ca. 300 €	WKZ:	0 €
FK+MK	ca. 2500–3000 €	FK+MK	ca. 1500 €	FK+MK	ca. 650 €
Spirale	ca. 700 €	Spirale geschw.	ca. 700 €	Spirale geschw.	ca. 700 €
Zylinder	ca. 350 €	Zylinder	ca. 350 €	Zylinder	ca. 350 €
Parafin	ca. 260 €	Parafin	ca. 260 €	Parafin	ca. 260 €
SUMME:	ca. 12.310 €	SUMME:	<b>ca. 3110 €</b>	SUMME:	ca. 1960 €

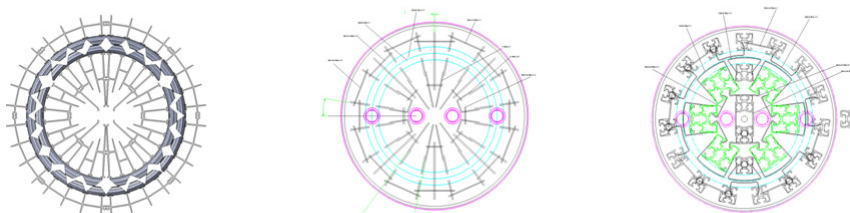


Abbildung 21: Kostenvergleich verschiedener Herstellungsverfahren



Nach Auswertung aller Informationen sowie dem Feedback aus dem Konsortium wurde das Konzept mit den Laser /Stanzteilen für die weiteren Schritte definiert. Die exotischen Varianten wie das reine Metallschaummodul und das Gußmodul blieben in der engeren Auswahl, wurden aber aufgrund der sehr hohen Fertigungskosten nicht weiter optimiert.

#### 4.2.2 Rohrwendel

Es wurden verschiedene Typen an Rohrwendeln recherchiert. Die geschweißte Rohrwendel zeigte sich als zu teuer und wurde verworfen. Die Rohrwendel aus flexiblem Wellrohr findet Anwendung in der Solarindustrie. Zwei Standardrohre komplett gewickelt und gebogen, Toleranzen  $\pm 5\text{mm}$ , weisen eine große Oberfläche auf, sind flexibel, biegsam, leicht und dünnwandig (0,2 - 0,5mm). Die Enden sind konfektionierbar. Die Abbildung 22 zeigt das ausgewählte Rohrwendelsystem.



Abbildung 22: Rohrwendel aus flexiblem Wellrohr

#### 4.2.3 Speicherkonstruktion komplett

Im Rahmen des Projektvorhabens wurden unterschiedliche Aufbaukonzepte für den Gesamtspeicher entworfen und gemäß Aufgabenstellung bewertet. In Abb.23 ist das aktuelle abgestimmte Konzept dargestellt, welches im Konsortium verabschiedet wurde. Die maschinelle Herstellung kann ohne Werkzeuge erfolgen.

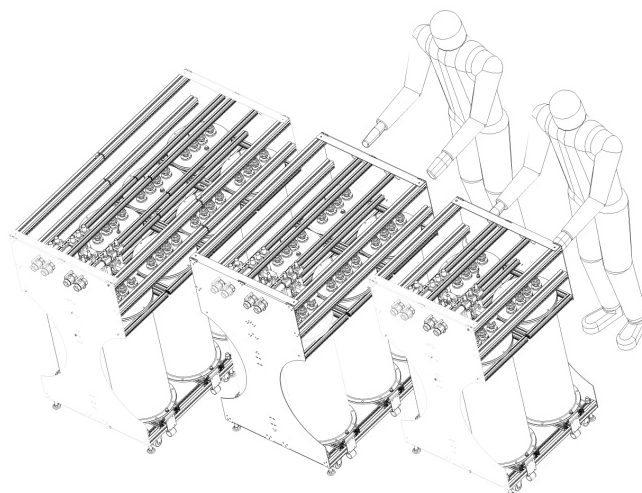


Abbildung 23: Gesamtspeicherkonzept mit integrierten Einzelspeichermodulen

Das Verkleidungskonzept und Isolationskonzept ist in der Abb. 24 dargestellt. Die Steuerungstechnik wurde durch ein integriertes Touchpanel mit CPU-Einheit realisiert.

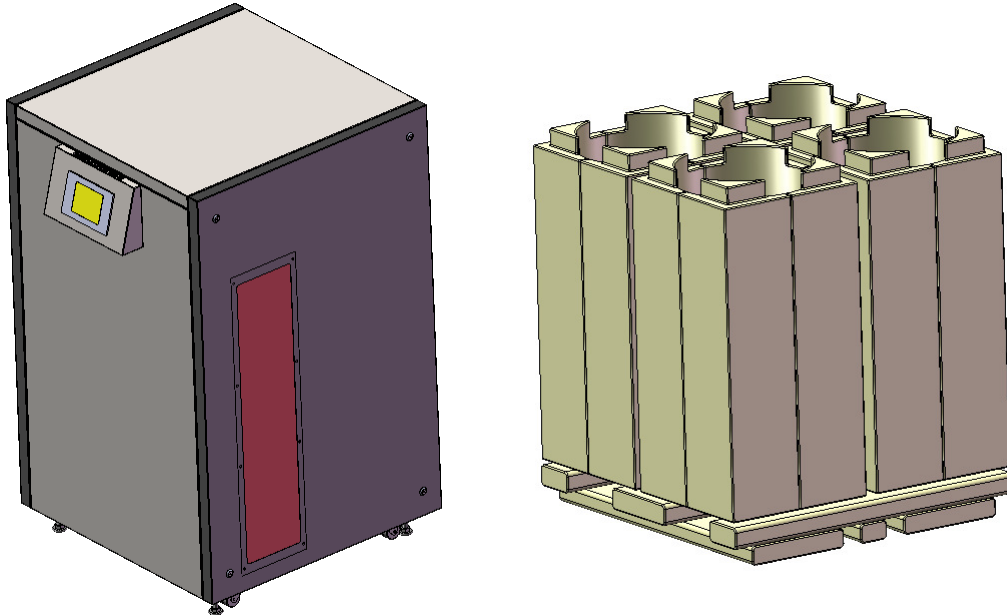


Abbildung 24: Verkleidungs- und Isolationskonzept

Nach der Konstruktionsphase standen somit entsprechende Stücklisten, Konstruktionszeichnungen, Fertigungszeichnungen und die Einzelkosten für die Teile als Basis für den Bau des Demonstrators zur Verfügung. Parallel zu der Konstruktion erfolgte eine ausgiebige Testphase zur Validierung der konstruktiven Ansätze und deren Optimierung. Die einzelnen experimentellen Einrichtungen und die erzielten Ergebnisse sind im nächsten Abschnitt ausführlich dargestellt.

## 5 Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der Auslegung und Konstruktion wurden umfangreiche Berechnungen (CFD+analytisch) durchgeführt, um eine geeignete Stegkonstruktion zu entwerfen. Insgesamt konnten 3 Varianten an Speichermodulen entworfen werden, wobei deren Funktionsweise durch Experimente validiert werden musste. Eine Entscheidung für den Gesamtspeicher (welche Art von Einzelspeichermodul einzubauen ist) konnte ohne diese experimentelle Validierung nicht getroffen werden, da das Kostenrisiko als zu groß eingeschätzt wurde. Die experimentelle Validierung erfolgte in drei essentiellen Phasen:

- Phase 1:** Erprobung Einzelspeichermodulevarianten → Entscheidung für eine Variante
- Phase 2:** Erprobung Einzelspeichermodule in Kombination (Verschaltung, 4 Module)
- Phase 3:** Erprobung finaler Demonstrator, finale Steuerung und Regelung, Schaltung der Module automatisiert

## 5.1 Erprobung Einzelspeicher

### 5.1.1 Einzelversuchsstand

Zu den Komponenten des Versuchsstandes zählen unter anderem ein Boiler, ein Regenwasserauffangbehälter, ein Rohrleitungssystem, mehrere Ventile, eine Pumpe, eine Solarthermieanlage und unterschiedliche Aluminiumprofile als Basis für die Rahmenkonstruktion. Der Boiler verfügt über eine Temperaturregelung, um das Speichermodul mit definierten Temperaturen zu beladen. Er hat ein Fassungsvermögen von 400 l Wasser und dient als Wärmequelle. Der Boiler besitzt eine maximale Leistung von 6 kW (Starkstromanschluss).

Das Wasser wird über Heizelektroden erwärmt, wodurch elektrische in thermische Energie umgewandelt wird. Die Solarthermie-Anlage soll ebenfalls bei geeigneten äußeren Bedingungen der Wetterverhältnisse als Wärmequelle dienen. Der Auffangbehälter hat ein Fassungsvermögen von 1000 l Wasser und dient beim Beladen des Speichers als Sammelbehälter für das abgekühlte Fluid. Umgekehrt liefert der Auffangbehälter das Kaltwasser zur Entladung des Einzelspeichermoduls. In Abb. 25 ist der Warmwasserboiler, ein Einzelspeichermodule (Steckblech-Variante) mit Rahmenkonstruktion und installierten und angeschlossenen Leitungen sowie der Auffangbehälter des Versuchsstandes dargestellt.



Abbildung 25: Boiler, Einzelspeichermodule mit Verrohrung und Auffangbehälter des Versuchsstandes



Der Prüfstand befindet sich bei TinniT Technologies GmbH. Hier wurden auch die Versuche an den Einzelspeichermodulen durchgeführt. Eine Solarthermieanlage, die aus einem leistungsstarken Flachkollektor mit einem ultraschall-geschweißten Vollflächenabsorber aus beschichtetem, hochselektiven Kupfer besteht, wurde auf dem Dach mit Hilfe eines Montagesystems für Flachdächer installiert. Die Absorberfläche beträgt 2,23 m<sup>2</sup>. Die Ausrichtung des Kollektors erfolgte in Richtung Süden unter einem Aufstellneigungswinkel von 45 Grad. Die Solarthermieanlage ist mit dem Versuchsstand über einen Wasserkreislauf verbunden, so dass bei Sonnenschein die Wärmezufuhr aus dem Kollektor erfolgen kann. Der montierte Flachkollektor und die Pumpe, die für die Versuche eingesetzt sind, sind in Abb. 26 abgebildet.



Abbildung 26: Installierte zentrale Pumpe und Solarkollektor

Der Versuchsstand kann in drei verschiedenen Kreisläufen betrieben werden:

- Beladung des Speichermoduls (Warmwasser aus Boiler)
- Entladung des Speichermoduls (Kaltwasser aus Auffangbehälter)
- Beladung des Speichermoduls über die Solarthermieanlage

Die Be- und Entladekreisläufe stellen streng genommen keinen Kreislauf dar, da hierbei das Fluid jeweils nur in eine Richtung fließt. Im Gegensatz dazu entsteht beim Betrieb des Versuchsstandes mit der Solarthermieanlage tatsächlich ein Kreislauf zwischen Boiler, Pumpe und Solarthermieanlage. Trotzdem werden im Folgenden alle drei Betriebsarten als Kreisläufe bezeichnet. In Abb. 27 ist der Aufbau des Versuchsstandes mit allen Komponenten und den drei Kreisläufen schematisch dargestellt. Die Solarthermieanlage ist dabei als Halbkugel abgebildet, um zu signalisieren, dass hier jede Art von Kollektor eingesetzt werden kann.

Die in Abb. 27 gelb markierten Leitungen gehören zum Kreislauf der Erwärmung des Wassers im Boiler allein durch die in der Solarthermieanlage gewonnenen thermische Energie. Dazu wird das Wasser aus dem Boiler über die Pumpe zur Solarthermieanlage und wieder zurück gepumpt. Das Speichermodul und der Regenwassertank sind hierbei nicht in den Kreislauf involviert. Der Beladekreislauf wird durch die rot markierten Rohrleitungen symbolisiert. Wie schon erwähnt kommt hierbei kein wirklicher Kreislauf zustande. Das Fluid wird zum Beladen des Speichers im Boiler auf eine gewünschte Temperatur erhitzt, dann mittels Pumpe durch den Speicher gefördert und im Regenwassertank aufgefangen. Die umgekehrte Strömungsrichtung stellt dann den Entladezyklus mit entsprechend blau markierten Rohrleitungen dar,

wobei dann das Wasser aus dem Tank in den Boiler gepumpt wird. Soll nur das Wasser ohne das Speichermodul durchströmen, dann kann dies mit entsprechender Ventilstellung ebenfalls realisiert werden. Die schwarz markierten Rohrleitungen dienen als Leitungen für weitere Kreisläufe.

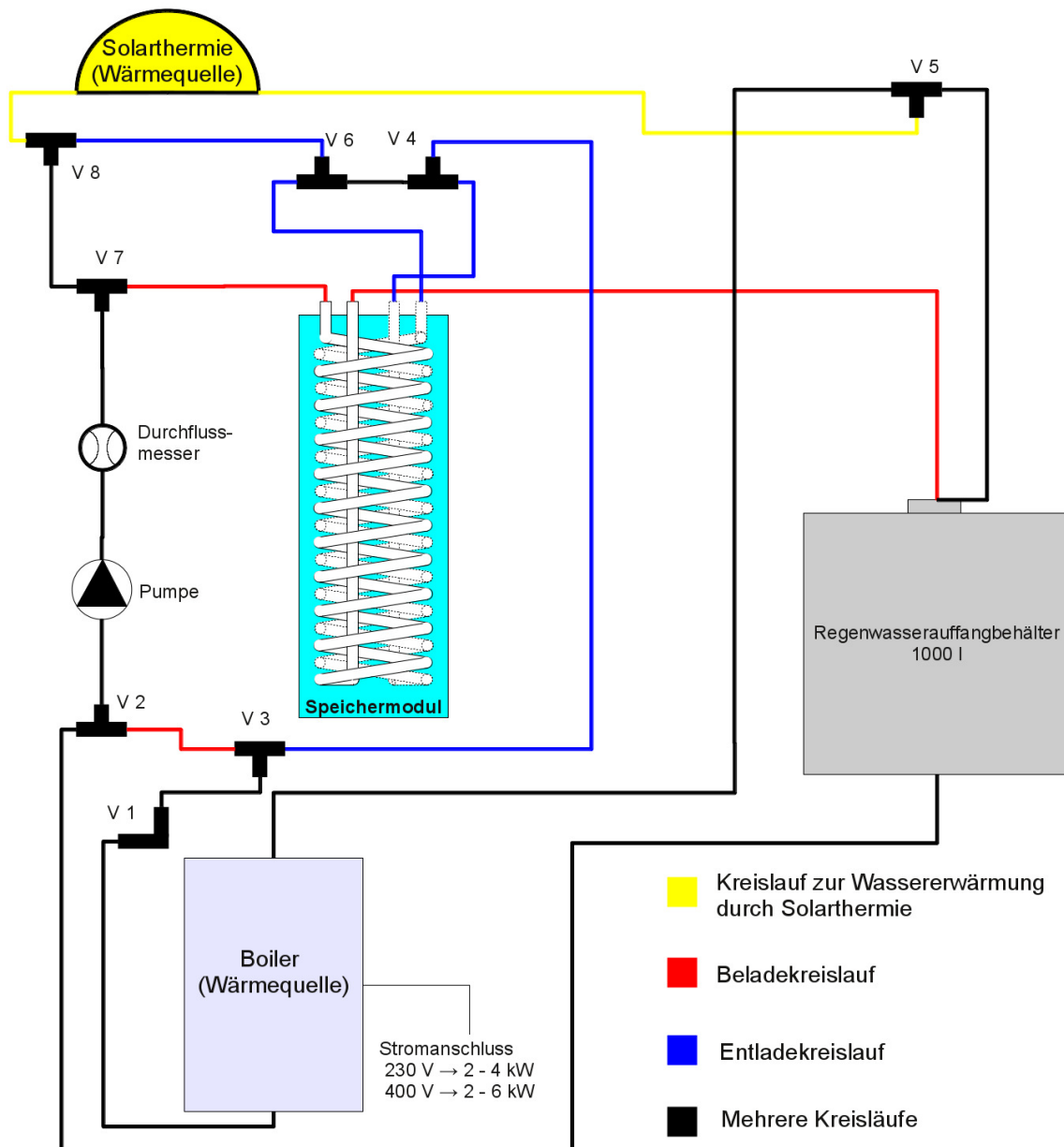


Abbildung 27: Schematische Darstellung des Versuchsstandes

Um das Aufschmelzverhalten des Paraffins im Latentwärmespeicher zu untersuchen, wurden Temperaturmessstellen im Speicher integriert. Auf Grund der bekannten Schmelztemperatur  $T_s$  des verwendeten Paraffins und der während eines Zyklus gemessenen Temperaturen kann somit ermittelt werden, ob sich das Paraffin im festen oder flüssigen Zustand befindet. Um die Messungen reproduzierbar durchführen zu

können, wurden die Mess-Sensoren auf einer Messplatte angebracht. Die Fixierung erfolgte über Klemmverschraubungen, die dem Durchmesser der Temperatursensoren angepasst sind. Außerdem ermöglichen diese eine stufenlose Einstellung der Messtiefe. Die dazu verwendete Messplatte wurde von der Firma engtec konstruiert und gefertigt.

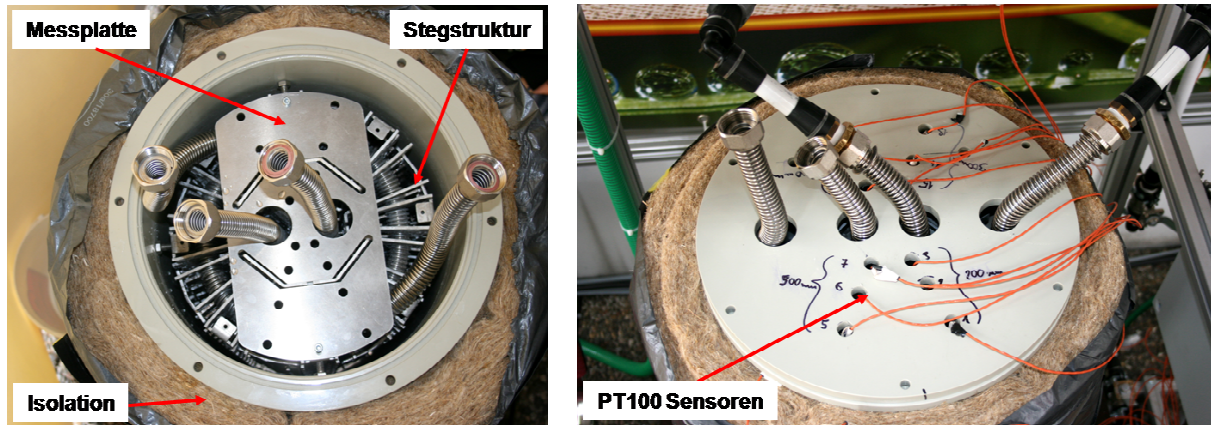


Abbildung 28: Montierte Messplatte und Temperatursensoren

Abb.28 zeigt hierzu die Messplatte mit den Mess-Sensoren. Auf der Platte stehen 16 Plätze zur gleichzeitigen Temperaturmessung zur Verfügung. Zusätzlich sind für die Temperatursensoren Abstandshalter vorgesehen, die den Kontakt zu den Aluminiumrippen verhindern und damit die Temperaturmessung im Paraffin gewährleisten. Zur Ausrichtung befinden sich Aussparungen in der Messplatte, die der Rippenstruktur angepasst sind. Durch die hohe Anzahl an Steckplätzen auf der Messplatte bietet sich ein Vielzahl an Möglichkeiten, das Aufschmelzverhalten über die Temperaturmessergebnisse zu charakterisieren. Über die Höhe sind mindestens drei Messstellen vorgesehen. Gemessen wird ausgehend vom Deckel des Speichers in einer Tiefe von  $h_1 = 200$  mm,  $h_2 = 300$  mm und  $h_3 = 500$  mm. Für die Versuche wurde die Lage der Messaufnehmer dokumentiert. Das Wärmeeindringverhalten kann über den Enthalpiestrom des Wärmeträgermediums beurteilt werden. Dazu wird die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Eintritt ( $T_E$ ) und Austritt ( $T_A$ ) des Fluids gemessen und somit kann mit bei paralleler Messung des Volumenstroms der Enthalpiestrom wie folgt bestimmt werden.

$$\Delta \dot{H} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_A - T_E) = \dot{Q}_{ab}$$

Der gemessene Enthalpiestrom entspricht dem vom Fluid abgeführten bzw. dem Einzelspeicher zugeführten Wärmestrom. Hieraus kann letzten Endes exakt ermittelt werden, wie das Wärmeübertragungsverhalten an das Einzelspeichersystem ist.



### 5.1.2 Versuchsdurchführung

Insgesamt wurden drei unterschiedliche konstruktive Designvarianten des Einzelspeichermoduls untersucht, in dem Belade- und Entladezyklen mit verschiedenen Volumenströmen gefahren wurden. Bei den Speichermodulvarianten handelt es sich um eine Metallschaum-Variante, eine Gußvariante und eine Steckblech-Variante. In Abbildung 5.6 sind die einzelnen Einzelspeichermodule ohne Paraffin dargestellt. Bei der Metallschaum-Variante handelt es sich um einen groben Prototyp, bei dem die Kupferwendel in einen Aluminiumring eingegossen ist. Dadurch ergibt sich eine sehr gute thermische Anbindung.

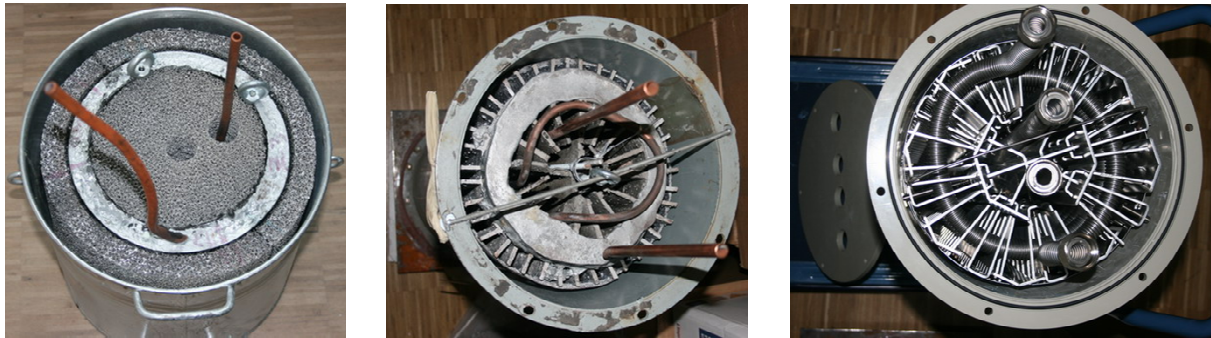


Abbildung 29: Varianten an Einzelspeichermodulen

Das Eingießen der Rohrwendel ist allerdings sehr aufwendig. Durch den hohen Metallanteil im Speichermodul und die notwendigen Herstellungsprozesse sind die Fertigungskosten sehr hoch. Wie bei der Metallschaumvariante ist auch bei der Gußvariante die Kupferwendel eingegossen, wodurch sich auch hier eine sehr gute Anbindung von Rohrwendel zur Stegstruktur ergibt. Der Nachteil dieser Variante ist, dass das Gießen von Stegstrukturen mit integrierter Rohrwendel noch äußerst schwierig ist. Die einzige Möglichkeit, die bis jetzt besteht, ist die Rohrwendel mit einem massiven Aluminiumblock an die Stegstruktur oder den Metallschaum anzubinden. Bei dem hier untersuchten Guß-Modell herrschen noch keine optimalen Verhältnisse von Struktur zu freiem Volumen. Alle fertigungstechnischen Nachteile der bereits genannten Einzelspeichermodule sind im Falle der Steckblech-Variante nicht mehr relevant. Das Steckblechmodul ist zu 100% reproduzierbar, da es sich um genormte Steckteile handelt. Eine Serienfertigung und somit ein automatisierbarer Herstellprozess ist somit gewährleistet. Allerdings ist bei dieser Variante der Kontakt zwischen Rohrwendel und Struktur kritisch, da es sich nur teilweise um einen flächenschlüssigen Kontakt handelt. Das Wärmeeindringverhalten wird daher maßgeblich von der Rohrwendelanbindung abhängig. Mögliche Optimierungsmaßnahmen (Metallschauminlets, Klemmbleche, etc.) werden aus diesem Grund bei den Versuchen der Steckblech-Variante mit analysiert.

In Tabelle 6 sind einige der durchgeführten Experimente aufgeführt. Unterschieden wurde dabei die Versuchskonfiguration, die hier mit VK abgekürzt wird. Bei allen Versuchen wurden mehrere Belade- und Entladezyklen durchgeführt, so dass eine Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gewährleistet ist. Im Nachfolgenden wird ein Versuchsergebnis für die Beladung und Entladung jeder Konfiguration ausgewertet. Die Versuche der Steckblech-Variante konnten dabei noch untereinander

verglichen werden, da hier auch die Optimierung der Rohrwendelanbindung untersucht wird. Folglich existieren für die Steckblech-Variante mehrere Versuchskonfigurationen, um die Optimierungsmaßnahmen zur Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen Struktur und Rohrwendel zu validieren.

Bei den Klemmen handelt es sich um Aluminium-Klammern mit Wärmeleitpad, die zwischen Rohrwendel und Stegstruktur angebracht werden. Dadurch entsteht ein flächenschlüssiger Kontakt. Diese Maßnahme soll die Wärmeleiteigenschaften zwischen Rohrwendel und Steckblechen verbessern. Bei den Metallschauminlets, die in den Steckblechzwischenraum gefüllt werden, handelt es sich um eine Verbesserungsmöglichkeit der Wärmeleitfähigkeit im Paraffin. Das Add-on Doppelwendel bedeutet, dass bei diesen Versuchen beide Rohrwendeln nacheinander durchströmt werden. Die Lauflänge und damit die Verweilzeit des Wärmeträgerfluids wird dadurch erhöht.

Konfiguration	Variante	Masse RT58 [kg]	Add-on
VK01	Steckblech	34	-
VK02	Steckblech	34	Klemmen
VK03	Steckblech	34	Klemmen / Doppelwendel
VK04	Steckblech	34	Klemmen / Doppelwendel / Metallschauminlets
VK05	Metallschaum	38	-
VK06	Guß	34,5	-

Tabelle 6: Ausschnitt aus Versuchsmatrix

### 5.1.3 Versuchsergebnisse

In Abb. 30 ist der zeitliche Verlauf der mittleren Speichertemperatur von Versuch VK01 und VK02 gegenübergestellt. Da die Einzelspeichermodule im Prüfstand für die Versuche jeweils fest integriert sind, ist es nicht möglich zu Versuchsbeginn immer die gleichen Anfangsbedingungen zu erhalten. Dies zeigt sich deutlich in Abb. 30, da die jeweilige Temperatur zu Beginn des untersuchten Versuches variiert. Bei beiden Versuchen handelt es sich um einen Beladeversuch der Konfiguration VK01 und VK02 bei einem Volumenstrom von 3 l/min. Um eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Versuche untereinander zu erzielen, wird zur Interpretation der Versuchsergebnisse ein Temperaturintervall von 15 K um den Schmelztemperaturbereich von (50 °C bis 65 °C) betrachtet. Dabei beginnt die Zeitählung, wenn die mittlere Speichertemperatur 50 °C beträgt und endet, wenn die mittlere Speichertemperatur 65 °C erreicht hat. Das entsprechende Diagramm, das sich auf den eben genannten Temperaturbereich bezieht, ist in Abbildung 31 für einen Be- und einen Entladeversuch mit einem Volumenstrom von 3 l/min für die Versuchskonfigurationen VK01 und VK02 dargestellt. Beim Beladeversuch zeigt sich, dass die Versuchskonfiguration VK02 schneller den Schmelztemperaturbereich erreicht als VK01. Bei VK02 wurden für einen besseren Wärmeübergang zwischen Rohrwendel und Steckblechen Klemmen integriert. Durch diese Maßnahme beginnt das Paraffin 13 Minuten eher zu schmelzen, was sich auch auf den weiteren Temperaturverlauf und das Wärmeeindringverhalten positiv auswirkt. Bei der Entladung ergibt sich durch die Integration der Klemmen nur ein geringer zeitlicher Vorteil von ca. 3 Minuten. Dies lässt sich voraussichtlich auf den flüssigen Zustand des Paraffins zurück führen, da



so die Wärmeleitung auch bei VK01 zwischen Rohrwendel und Stegstruktur begünstigt wird.

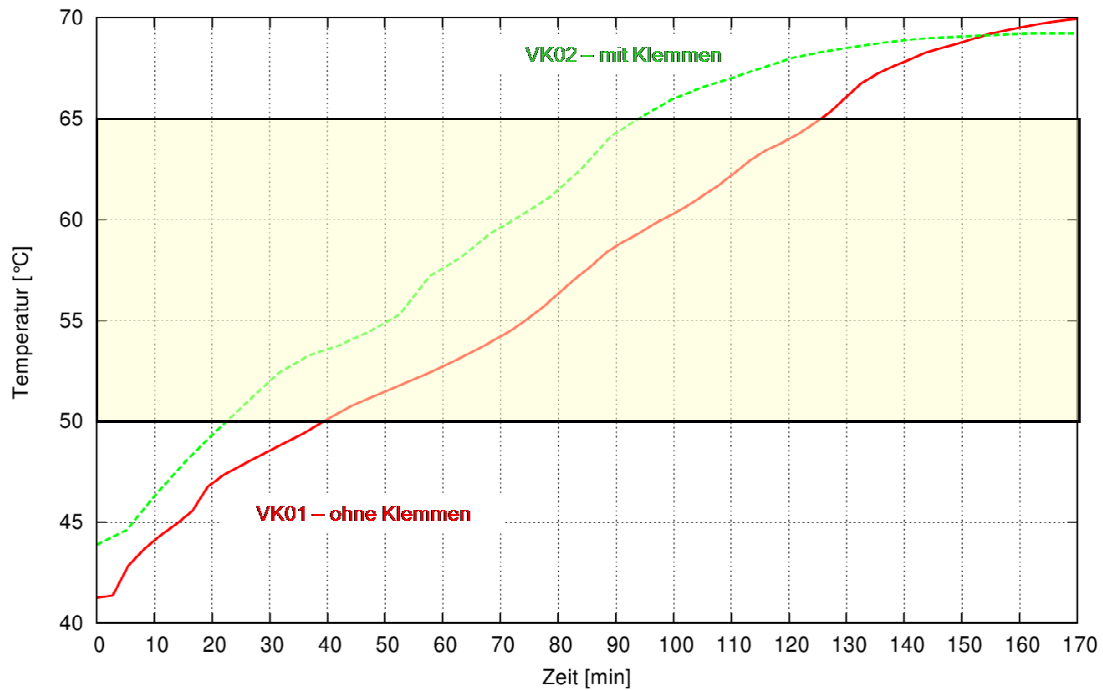


Abbildung 30: Mittlere Speichertemperatur bei der Beladung(VK1/VK2)

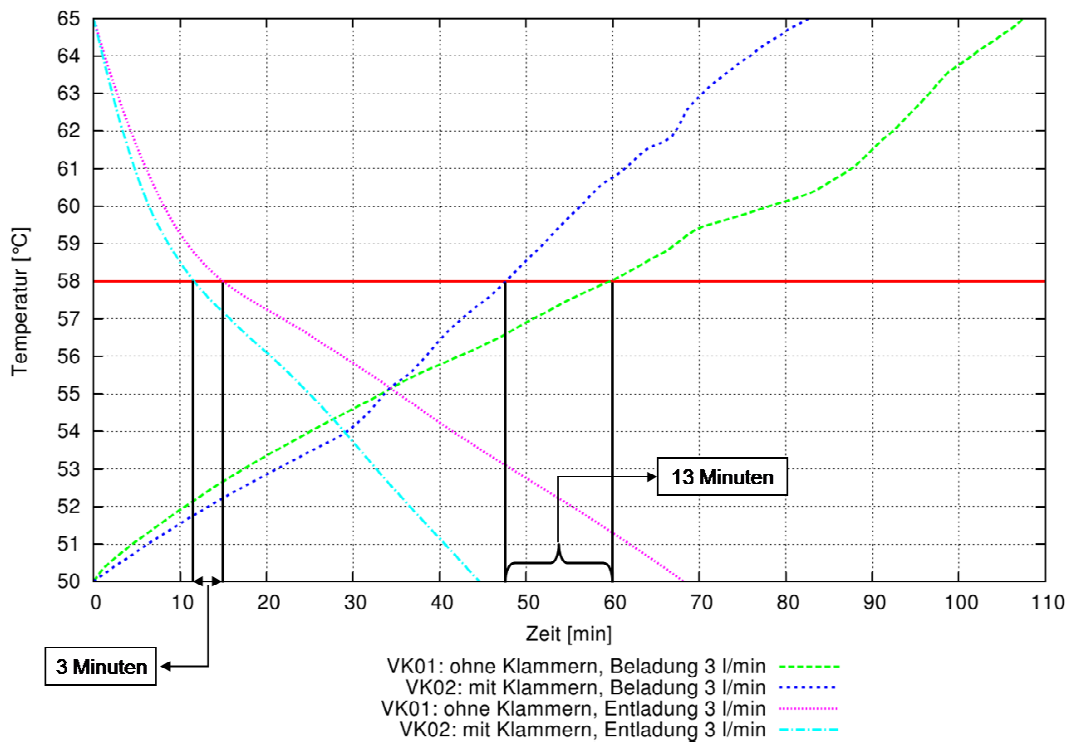


Abbildung 31: Mittlere Speichertemperatur bei der Be- und Entladung (VK1/VK2)

Die weiteren Einzelspeichervarianten lieferten hinsichtlich der Speicherdichte vergleichbare Werte, allerdings ist das Zeitverhalten aufgrund der erheblich besseren Anbindung der Rohrwendel besser. Trotzdem wurden diese Varianten verworfen, da der Herstellungsprozeß nicht reproduzierbar ist und somit eine Serienfähigkeit zum derzeitigen Zeitpunkt und auch in absehbarer Zeit nicht gegeben ist. Weitere Details zu den Versuchen sind aus patentrechtlichen Gründen nicht für die Veröffentlichung gedacht und werden somit in diesem Bericht nicht weiter ausgeführt. Der nächste Abschnitt widmet sich den Verschaltungsexperimenten von Einzelspeichersystemen.

## 5.2 Versuche zur Verschaltung der Einzelspeicher

### 5.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsstand zur Erprobung von Verschaltungsvarianten von Einzelspeichermodulen wurde an der HS-Karlsruhe aufgebaut und beinhaltet vier selbstständige Speichereinheiten, die völlig autark arbeiten können. Dieser modulare Aufbau wurde verwendet, um kleine Einheiten beliebig beladen zu können. Die Messungen sollten u.a. zeigen, welche Schaltungen (parallel – seriell) die besten, sprich die schnellsten, Speichereigenschaften besitzen.

Die Konstruktion wurde von der Firma engtec zügig vorangetrieben, so dass es bald möglich war, den Speicher zu bauen. Die von engtec bevorzugte Blechvariante wurde eingesetzt und mit der notwendigen Messtechnik versehen. Die elektrische Verkabelung erstellte eine Fremdfirma, die Programmierung mit LabView übernahm das Team an der HS-Karlsruhe. Die Anbindung an das vorhandene Blockheizkraftwerk wurde durchgeführt und nach mehreren Versuchen im Februar 2012 endgültig fertiggestellt. Abb. 32 zeigt den Versuchsaufbau mit den verschiedenen Komponenten.

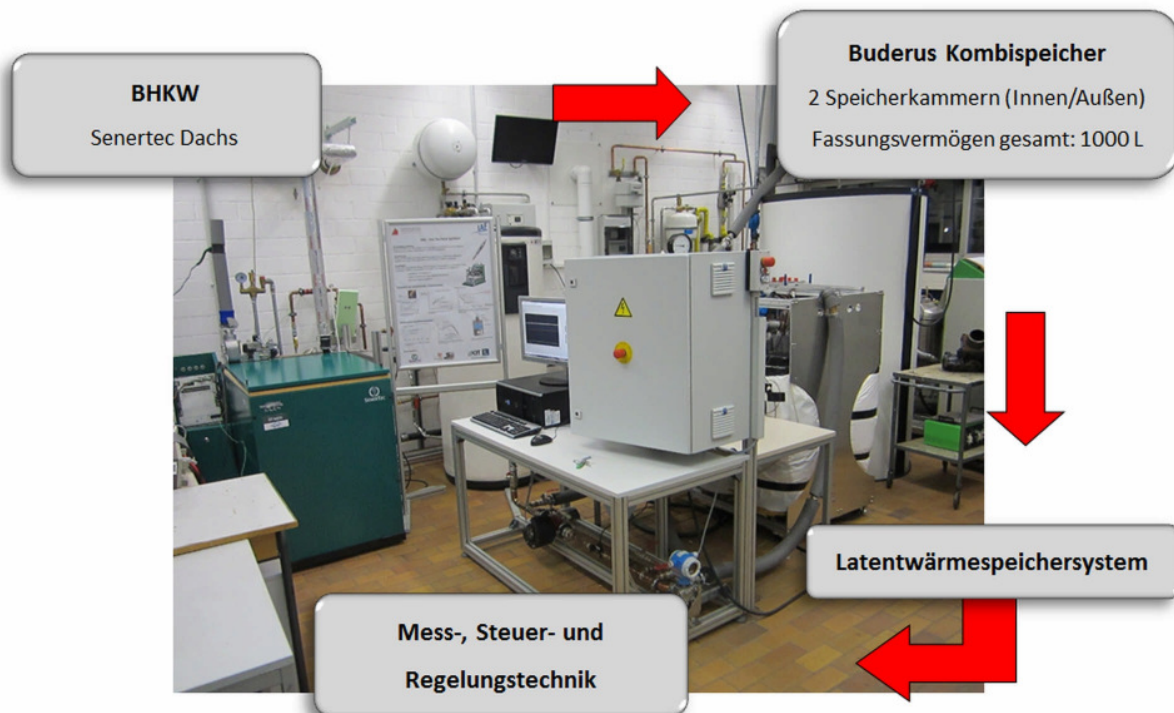


Abbildung 32: Versuchsaufbau und Komponenten

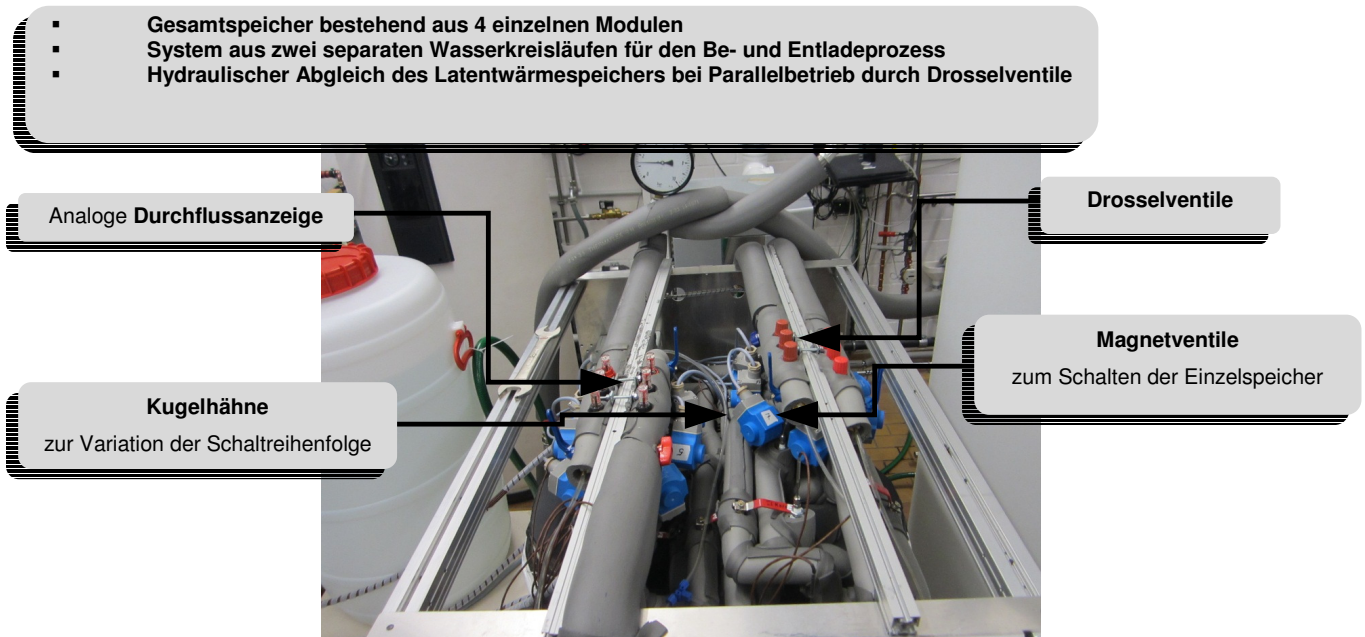


Abbildung 33: Drossel- und Magnetventile

In den Latentwärmespeicher sind zwei Rohrwendeln integriert, die am Wasserkreislauf des Labornetzes zwischengeschaltet sind und somit als Lieferant der Energie dienen, die es zu speichern gilt. Das Blockheizkraftwerk liefert die Wärme, die intern über einen Wärmetauscher an das Nutzwasser weitergegeben wird. Da diese Wärmemenge nicht ausreichte, wurde direkt das warme Wasser verwendet. Um möglichst viel Schmutz vor dem Speicher zu entfernen, wurde ein Filter eingesetzt, der die groben Schwebeteilchen aussonderte. Zusätzlich wurde zur Unterstützung des Wärmetransports ein elektrischer Durchlauferhitzer verwendet, der die nötige Wärmemenge zur schnellen Beendigung der Messungen abgab. Das Be- und Entladen des Speichers muss aus regelungstechnischen Gründen voneinander entkoppelt sein.

Die Übertragung der Wärme von den warmwasserführenden Rohrwendeln wird durch eine Aluminiumstruktur unterstützt, die sich im Speicherzylinder möglichst gleichmäßig verteilt, um eine homogene Temperaturverteilung zu erreichen.

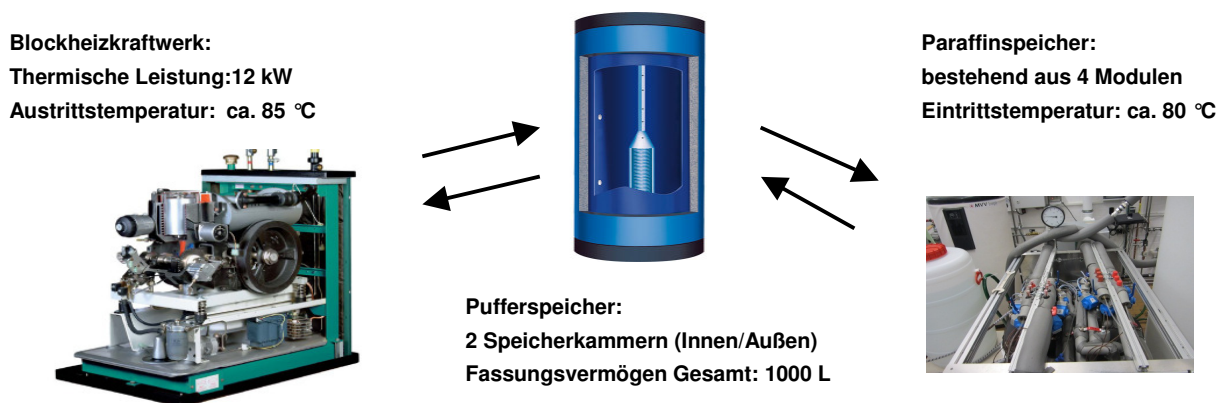


Abbildung 34: Heizkreislauf mit Blockheizkraftwerk und Pufferspeicher

Die Signalaufnahme wird über einen eigens für den Prototyp entwickelten Schalt-schrank realisiert. Die Signalverarbeitung wird über ein an der HS-Karlsruhe entwickeltes LabView-Programm durchgeführt.

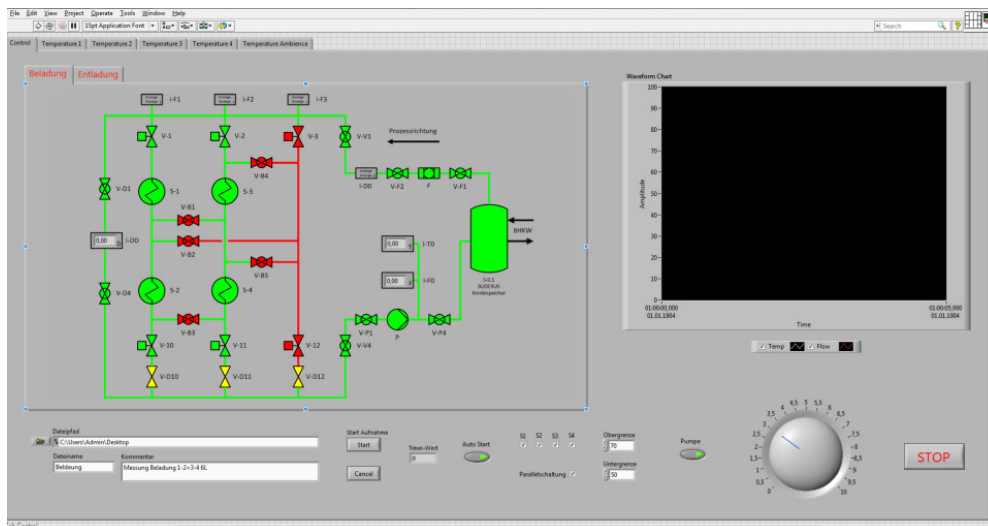


Abbildung 35: LabView Steuer- und Regelungseinheit

Abb. 35 zeigt die programmierte Oberfläche für die Datenvisualisierung mit integrierter Streueinheit. Die Daten wurden für die spätere Auswertung aufgezeichnet.

### 5.2.2 Versuchsergebnisse

Ziel der Versuche war, eine optimale Anordnung für die Speichermodule zu finden hinsichtlich folgender Größen:

- Druckverlust
- Be- / Entladung der Latentspeichermodule
- Einfluss Volumenstrom des Wärmeträgerfluides

Zunächst wurden die Druckverluste der einzelnen Speicher untersucht und bewertet. Die maximale Differenz der Druckverluste betrug ca. 22 mbar und wurde als akzeptabel eingestuft.

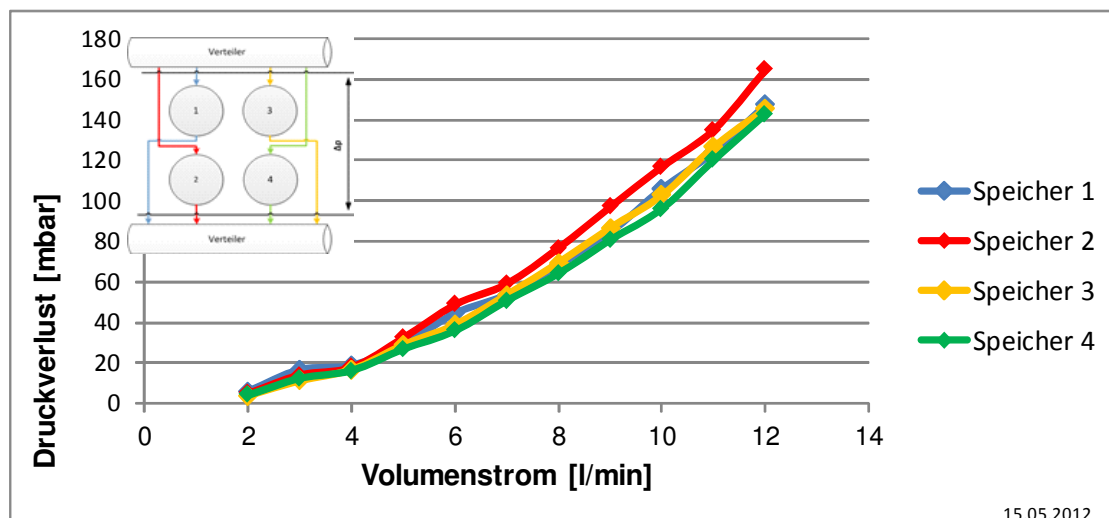


Abbildung 36: Gemessener Druckverlust für das Einzelspeichermodul

Die als mögliche Varianten vorgesehenen Reihen- bzw. Parallelschaltungen wurden ebenfalls auf Druckverluste untersucht und ergaben ebenfalls plausible Werte.

In einem Langzeitversuch wurden die Wärmeverluste der Speicher untersucht. Der durchschnittliche Wärmeverlust pro Speicher lag bei ca. 80 W – 100 W bei einer Beladetemperatur von 80 °C.

Abb. 37 zeigt die durchgeführten Versuche an dem Versuchsstand. Der Volumenstrom wurde sukzessive von 2 l/min auf 12 l/min erhöht. Dadurch war es möglich Kennlinien für den Druckverlust (siehe Abb. 36) und die Beladeweiten in Abhängigkeit des Volumenstroms zu ermitteln. Es wurden 14 Beladungsversuche und dieselbe Anzahl von Entladeversuchen gefahren. Damit ergaben sich 28 Versuche, die jeweils zwischen 2 und 5 Stunden Zeit in Anspruch nahmen. Die Messungen wurden in einem Temperaturbereich zwischen 50 °C und 70 °C, bei einer Beladetemperatur von 75 °C und einer Entladetemperatur von 14,5 °C, gefahren.

Abb. 38 zeigt die gespeicherte Wärmemenge in Abhängigkeit der Zeit für jeden einzelnen Speicher. Dabei berechnet sich die zugeführte Energie aus der Temperaturdifferenz von Wasserein- zu Wasseraustritt am Speicher (analog der Einzelspeicherversuche).

Volumenstrom Verschaltung		Volumenstrom					
		2 l/min	4 l/min	6 l/min	8 l/min	10 l/min	12 l/min
Art	Speicher-Nr.						
Einzel	1	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Grey
	2	Grey	Grey	Green	Grey	Grey	Grey
	3	Grey	Grey	Green	Grey	Grey	Grey
	4	Grey	Grey	Green	Grey	Grey	Grey
Reihe	1-2	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Grey
	3-4	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey
	1-3	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey
	1-2-3	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Grey
	1-2-3-4	Red	Green	Green	Green	Green	Grey
Parallel	2+4	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey
	1+3	Grey	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Reihe + Parallel	1-2+3-4	Grey	Green	Green	Green	Green	Red

Abbildung 37: Versuchsmatrix für die Verschaltungsversuche

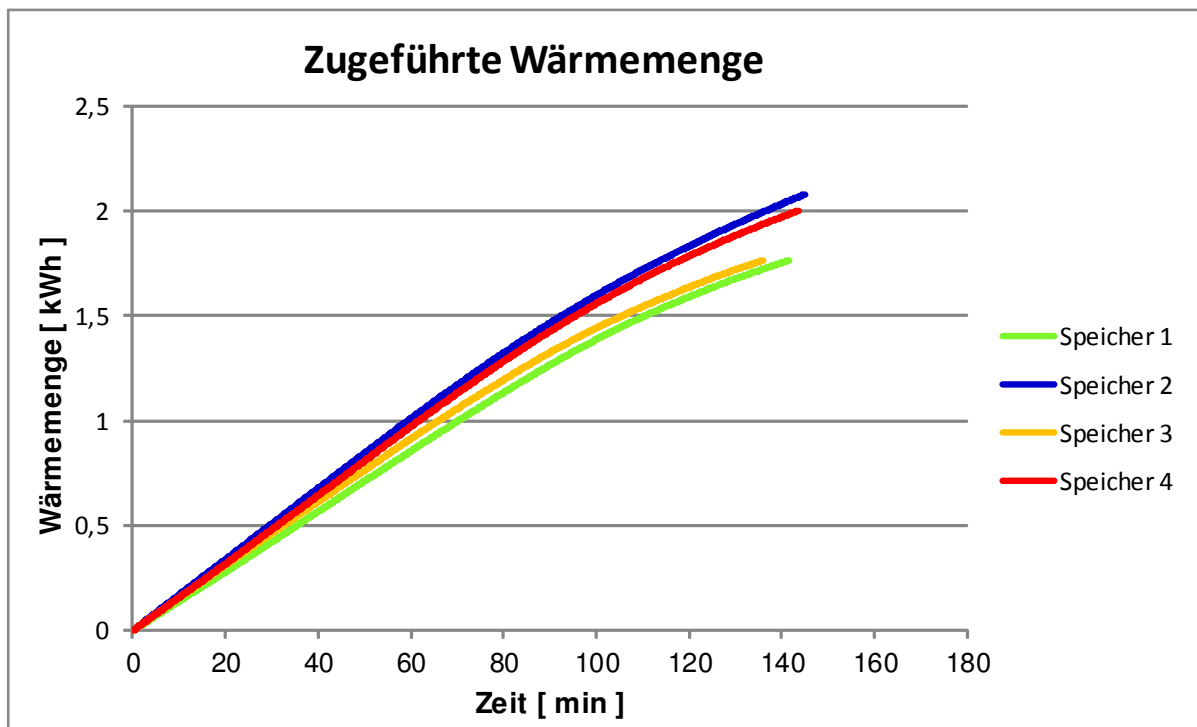


Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der zugeführten Wärmemenge

Alle vier Speicher zeigen annähernd gleiche Speicherkapazitäten und Beladezeiten (siehe Abb. 38). Die durchschnittliche zugeführte Wärmemenge beträgt 1,88 kWh bei einer Beladezeit von 2,3h. Eine entsprechend durchgeführte Entladebetrachtung erbrachte eine durchschnittliche abgeführte Wärmemenge von 1,61 kWh bei 1,5h Entladezeit. Ein wesentlicher Punkt der Untersuchungen sollte den Vergleich der Schal-



tungsmöglichkeit aller Speicherelemente beinhalten. Demzufolge wurden die Speicher in der dargestellten Weise verschaltet.

Dabei zeigte sich, dass die beiden Schaltungen keine wesentlichen Unterschiede aufwiesen. Die Parallelschaltung zeigte lediglich bei der Beladung leichte Vorteile gegenüber der Reihenschaltung. Dem gegenüber steht die etwas höhere Temperaturdifferenz bei der Reihenschaltung.

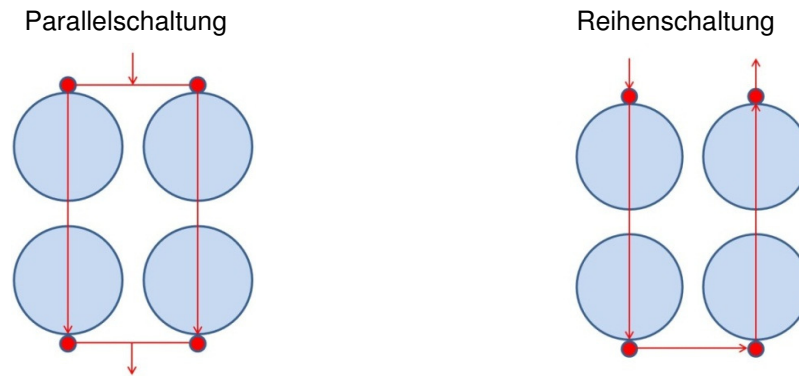


Abbildung 39: Parallel- und Reihenschaltung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Beladezeit mit höherem Volumenstrom verkürzt bei gleichzeitigem Sinken der erreichbaren Temperaturdifferenz (siehe Abb. 40). Positiv ausgedrückt kann man sagen, dass für jeden Anwendungsfall beide Möglichkeiten den Zweck erfüllen.

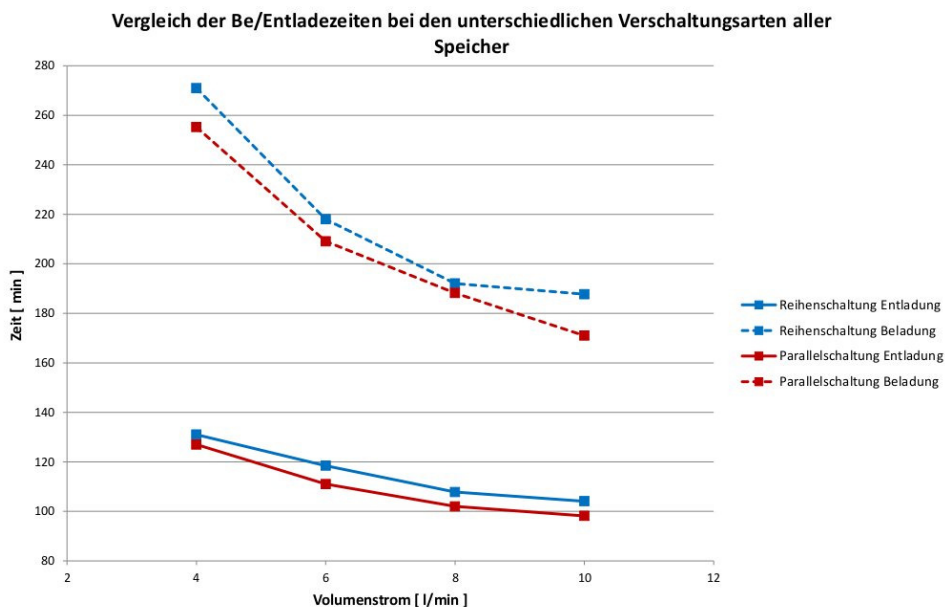


Abbildung 40: Belade- und Entladezeiten in Abhängigkeit des Volumenstroms

## 6 Simulationsstudien

Parallel zu den konstruktiven und experimentellen Arbeiten wurden in diesem Projektvorhaben umfangreiche Simulationsstudien zur Optimierung des Latentspeicherkonzeptes durchgeführt. Einige Simulationsstudien wurden bereits im Vorfeld zur Unterstützung der Auslegung des Speichersystems durchgeführt. Diese sind in Kapitel 3 dargelegt.

Wärmetransportvorgänge mit Phasenwechsel lassen sich mit kommerzieller Software nicht hinreichend genau beschreiben. Eine ausreichend genaue Modellierung von Phasenwechsellvorgängen allerdings ist entscheidend für eine Vorauslegung von Systemen, die thermisch induziert einen Phasenwechsel vollziehen und somit Wärme in Form von Schmelzwärme speichern.

Wird zudem das zu schmelzende Fluid durch Strukturen erwärmt, die ihre Temperatur zeitlich ändern, so entsteht ein instationär geprägtes Fluid-Struktur gekoppeltes System. Insgesamt handelt es sich um instationäre Wärmeleitung in Struktur und Fluid mit Phasenwechsel.

### 6.1 Studien zu Phasenwechsellvorgängen

Für die Simulationen der Phasenumwandlung und der Wärmediffusion im System „Metall-Matrix und ihre Füllung“ wurde ein Phasenfeldmodell erarbeitet, und zwar auf Basis der in umfangreichen Vorarbeiten am Institute of Materials and Processes (IMP) der Hochschule Karlsruhe entwickelten Phasenfeldmodelle zur Simulation komplexer Mikrostrukturausbildungen unter Berücksichtigung verschiedener physikalischer Feldgrößen.

Das Grundkonzept der Phasenfeldmethode ist das Aufteilen der Simulationsbereichs in Unterbereiche, genannt Phasen, und eine diffuse Grenzfläche zwischen den unterschiedlichen individuellen Phasen. Eine Phase enthält besondere Eigenschaften wie beispielsweise den Aggregatzustand, eine Anfangstemperatur, eine bestimmte Beschaffenheit, eine besondere Kristallorientierung und eventuell eine Eigenspannung. Zwei einzelne Phasen unterscheiden sich in mindestens einer dieser Eigenschaften. Diese detaillierte Modellierungsmöglichkeit von Phasen eröffnet die Berechnung von Phasenfronten unter Berücksichtigung von Oberflächenspannung und energetischem Zustand im Bereich um die Phasenfront, impliziert durch die Wärmetransportmechanismen wie Wärmeleitung. Ein Phasenwechsel findet statt, indem der Schmelzpunkt eines Materials überschritten wird. Die zugeführte Wärme wird hierbei teilweise durch die benötigte Schmelzwärme aufgebraucht und teilweise wird Wärme weitergeleitet. Unterhalb des Schmelzpunktes wird die Wärme in der Kapazität des Materials gespeichert, wodurch die Temperatur bei teilweiser Wärmeabfuhr ansteigt, bis der Schmelzpunkt des Materials erreicht wird. Der Phasenwechsel ist somit ein komplexer thermischer Prozess, wobei das aufgeschmolzene Material theoretisch auch fließen kann und somit konvektive Terme den Wärmetransportprozess mitbestimmen können.

#### 6.1.2 Pre- und Postprozessing

Der eigens entwickelte Algorithmus zur Erstellung von offen- und geschlossenporigen Materialien in 3D besteht im wesentlichen aus drei Schritten. Im ersten Schritt wird durch die Erzeugung einer dichten Kugelpackung die Größe und Verteilung der

späteren Poren vorbestimmt. Der zweite Schritt erzeugt aus den errechneten Daten ein Voronoi-Diagramm, welches im letzten Schritt genutzt wird um die poröse Struktur zu erstellen. Dabei können mit Hilfe von Parametern die Porengröße, Porenverteilung, Stegdicke und Stegform beeinflusst werden. Um die effektive Wärmeleitfähigkeit des Simulationsgebiets zu berechnen, wurde ein Nachbearbeitungsprogramm geschrieben. Mit seiner Hilfe können effektive Parameter, wie Wärmeleitfähigkeit gefüllter offenerporiger metallischer Schäume berechnet werden. Abb. 41 zeigt eine generierte Schaumstruktur anhand des Füllalgorithmus in Pace3D.

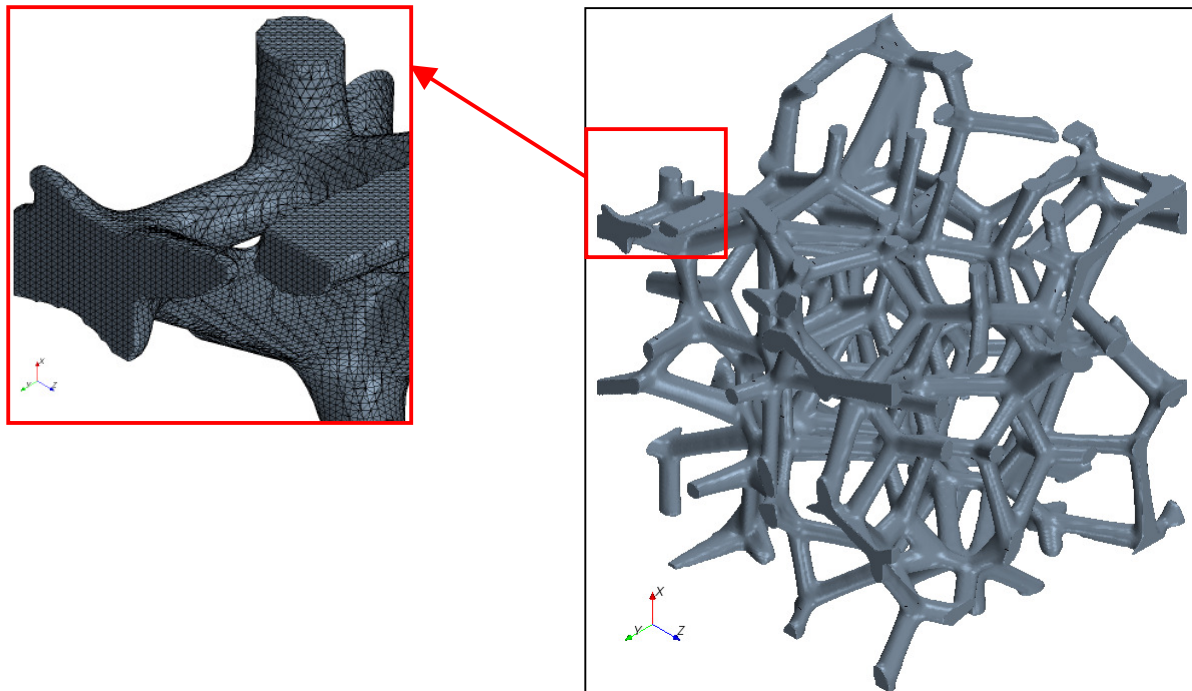
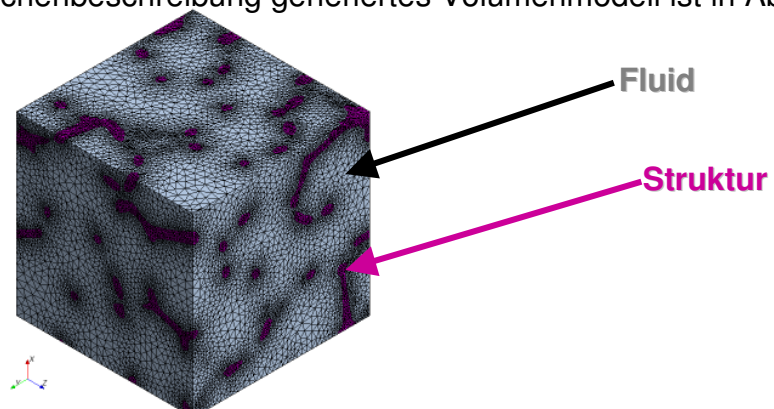


Abbildung 41: Generierung von Schaumstrukturen mit dem Füllalgorithmus von Pace3D

Eine wichtige Erweiterung innerhalb des Projektes war die Schaffung einer Schnittstelle zum Austausch von generierten Schaumstrukturen zwischen den verschiedenen Solvern. Dies ermöglichte den direkten Vergleich von Solvern anhand identischer Modelle (geometrisch), wobei die Diskretisierung des Rechengebietes aufgrund des jeweiligen Diskretisierungsverfahrens der Solver unterschiedlich ausfiel. Zur Abbildung der Bereiche zwischen den Stegen (Fluidraum) konnte die Oberflächenbeschreibung aus Pace3D in StarCCM+ (kommerzieller CFD Solver) verwendet werden. Ein aus der Oberflächenbeschreibung generiertes Volumenmodell ist in Abb. 42 dargestellt.

Abbildung 42: Volumennetz



### 6.1.3 Benchmark

Durch die im vorherigen Abschnitt erläuterte Vorgehensweise zur Modellbildung konnte die Basis für Vergleichsrechnungen zwischen den Solvern Pace3D und StarCCM+ geschaffen werden. Abbildung 43 zeigt die mit CFD berechnete Temperaturverteilung im Metallschaum zu verschiedenen Zeitpunkten.

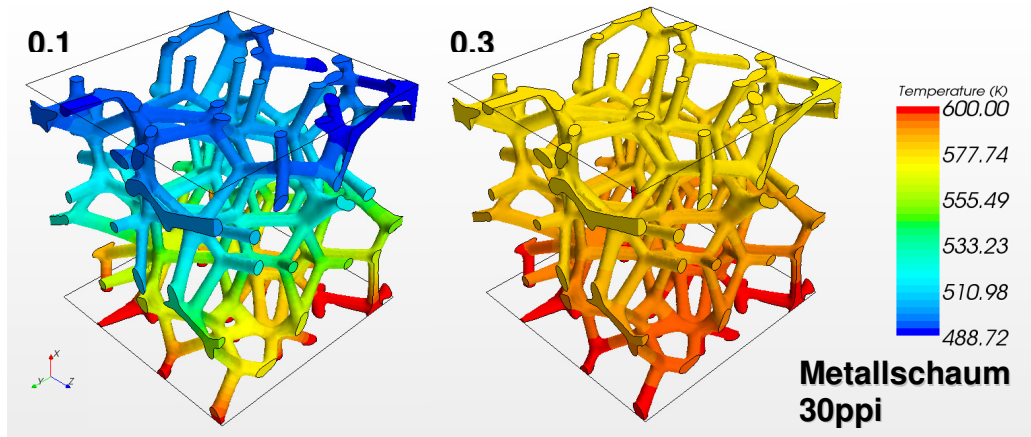


Abbildung 43: Mit StarCCM+ berechnete räumliche Temperaturverteilung an verschiedenen Zeitpunkten

Analog wurde die Berechnung mit Pace3D durchgeführt und die Ergebnisse gezielt verglichen, um somit für die weitere Vorgehensweise eine solide Basis zu schaffen. Abb. 44 zeigt den Vergleich der Ergebnisse, die mit den beiden Solvern erzielt wurden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Phasenwechsel nicht berücksichtigt wurde.

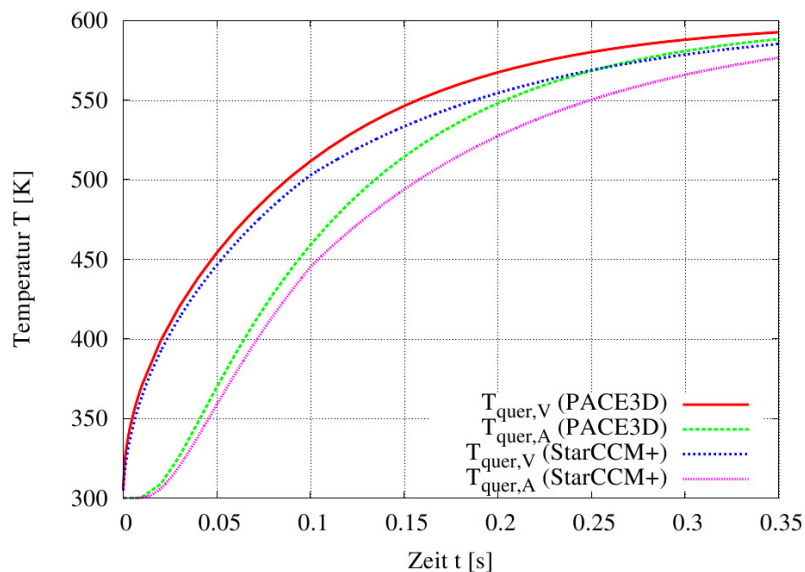


Abbildung 44: Mit Pace3D und StarCCM+ berechnete zeitliche Temperaturentwicklung im Metallschaum

Abb. 44 verdeutlicht, dass die erzielten Ergebnisse durchaus gut übereinstimmen, so dass für die weitere Vorgehensweise eine gute Basis vorhanden ist.

#### 6.1.4 Rolle der Oberflächenspannung für die Phasenumwandlung von Paraffin

Die Grenzflächenenergie zwischen einer festen und einer flüssigen Phase ist eine physikalische Größe, die diejenige Menge an Energie angibt, die aufgebracht werden muss, um die Grenzfläche um einen Quadratmeter zu vergrößern. Sie trägt die Einheit  $\text{J/m}^2$ . Für Simulationen des Phasenwechsels mit dem Phasenfeldlöser Pace3D spielt diese Größe eine entscheidende Rolle und wird zwingend benötigt. Auf der anderen Seite kommt StarCCM+ ohne den Wert der Grenzflächenenergie aus und kann diese auch nicht mit berücksichtigen. In diesem Kapitel soll tiefer auf die Bedeutung der Grenzflächenenergie eingegangen werden. Dabei soll

- die Grenzflächenenergie zwischen festem und flüssigem Paraffin abgeschätzt,
  - das Phasenumwandlungsmodul von StarCCM+ mit Ergebnissen von Pace3D validiert,
  - die Auswirkung verschiedener Grenzflächenenergien bei der Phasenumwandlung untersucht,
  - die energetische Bedeutung der Grenzflächenenergie im Gesamtmodul betrachtet
- und
- die Bedeutung der Grenzflächenenergie für den quantitativen Kristallisationsprozess von Paraffin in Metallschäumen beurteilt werden.

Literaturwerte für die Grenzflächenenergie zwischen festem und flüssigem Paraffin sind nicht bekannt. Auch der Lieferant des Paraffins, Rubitherm, verfügt über keine Daten zu Grenzflächenenergien oder Oberflächenspannungen. Das Messen von Grenz- bzw. Oberflächenspannung ist aufwendig und kostspielig. Da der Wert der Grenzflächenenergie für StarCCM+ prinzipiell nicht benötigt wird, liegt der Gedanke nahe, über eine Abschätzung die Größenordnung dieses Wertes zu bestimmen. In der Literatur finden sich zahlreiche Quellen für die Oberflächenenergie von festem Paraffin zu Luft. Die Firma KRÜSS GmbH gibt den Wert der Oberflächenenergie von festem Paraffin zwischen  $19$  und  $25,5 \text{ mJ/m}^2$  an. Weitere Angaben aus anderen Literaturstellen geben Werte bei Raumtemperatur zwischen  $19,3$  und  $35 \text{ mJ/m}^2$  an.

Für flüssige Paraffine mit Schmelzpunkten, die denen der verwendeten Paraffine entsprechen, sind nur wenige Quellen für die Oberflächenspannung bekannt. Aus den Literaturangaben ist zu erkennen, dass mit steigender Temperatur die Oberflächenspannung abnimmt. Geht man nun davon aus, dass die Young'sche Gleichung (Abbildung 6.13) mit der Annahme, dass der Kontaktwinkel zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  liegt und die Grenzflächenenergie  $\sigma_{LS}$  größer als  $0$  sein soll, erfüllt werden muss, so gelangt man zu folgender Abschätzung:

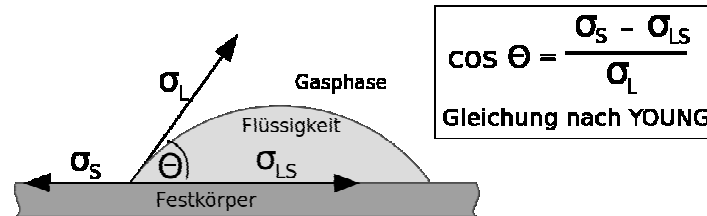
Wird die Young'sche Gleichung nach  $\sigma_{LS}$  aufgelöst, so ergibt sich:

$$\sigma_{LS} = \sigma_s - \sigma_L \cos(\theta)$$

Aus der Bedingung  $\sigma_{LS} > 0$  ergibt sich:  $\arccos(28/30) < \theta < 180^\circ$ , also  $21^\circ < \theta < 180^\circ$ . Nimmt man  $\sigma_S = 28 \text{ mJ/m}^2$  an und schätzt  $\sigma_L$  mit  $\sigma_L \approx 30 \text{ mJ/m}^2$  ab, so ergibt sich:

$$0 < \sigma_{LS} < 58 \text{ mJ/m}^2$$

Für weitere Untersuchungen soll die Abschätzung  $\sigma_{LS} \leq 100 \text{ mJ/m}^2$  als hinreichend genau angesehen werden.



- $\sigma_L$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit
- $\sigma_S$  = Oberflächenenergie des Festkörpers
- $\sigma_{LS}$  = Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper
- $\Theta$  = Kontaktwinkel

Abbildung 45: Young'sche Gleichung

### 6.1.5 Phasenumwandlung in 2D (Pace3D / StarCCM+)

Für den Vergleich in 2D wird folgender Simulationsaufbau gewählt (vgl. Abb. 46):

In der linken unteren Ecke befindet sich ein Keim, der aufgrund der angrenzenden Temperaturrandbedingung  $T_B = 20,9^\circ\text{C}$  wachsen kann. Alle übrigen Seiten sind adiabatisch. In den Abbildungen 47 und 48 ist zu erkennen, dass die Grenzflächenenergie einen Einfluss auf das Kristallisationsverhalten der festen Phase hat. Je höher die Grenzflächenenergie ist, umso höher muss die treibende Kraft (Unterkühlung) sein, um den Phasenwechsel zu vollziehen und eine größere Grenzfläche auszubilden. Für den Fall  $\sigma_{LS} = 10 \text{ J/m}^2$  verschwindet sogar der Keim; die Unterkühlung ist nicht groß genug. Auch kann festgestellt werden, dass mit niedriger Grenzflächenenergie der Phasenwechsel schneller abläuft. Dies ist damit zu erklären, dass die für einen Phasenwechsel benötigte Unterkühlung früher erreicht wird. Auf der anderen Seite kühlt das Simulationsgebiet bei höherer Grenzflächenenergie schneller ab, was auf die langsamere Kristallisationsgeschwindigkeit und den damit geringeren Eintrag von Kristallisationsenthalpie zurückzuführen ist.

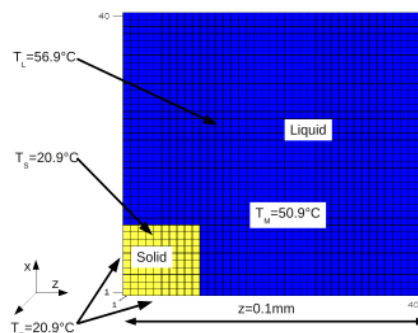


Abbildung 46: Startgeometrie



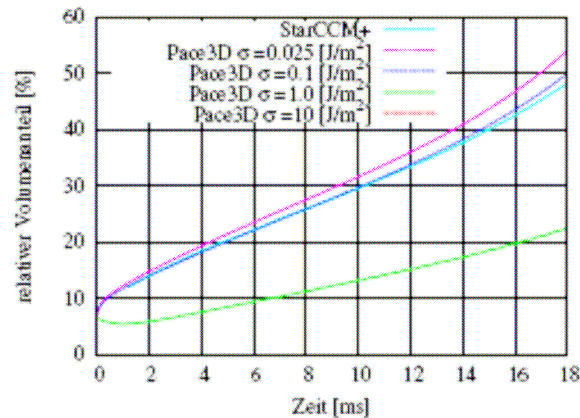


Abbildung 47: Vergleich von zeitlichem Aufschmelzvorgang in Abhängigkeit der Oberflächenenergie

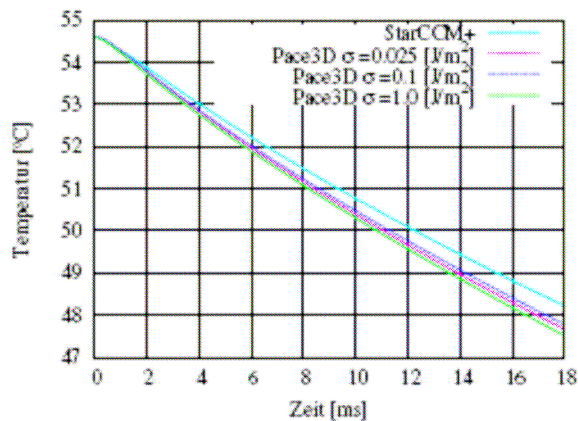


Abbildung 48: Vergleich von zeitlichem Erstarrungsvorgang in Abhängigkeit der Oberflächenenergie

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Grenzflächenenergie zwischen festem und flüssigem Paraffin einen sichtbaren Einfluss auf die Phasenumwandlung hat, wenn die Grenzfläche vergrößert wird. Diese Effekte sind mit StarCCM+ nicht darstellbar.

Aus Simulationen mit StarCCM+ und Messungen eines Einzelmoduls mit StarCCM+ kann entnommen werden, dass gerade in der Anfangsphase ein sehr hoher Energieeintrag von über 300 J pro Sekunde in das Speichermodul stattfindet. Auch nach mehreren Stunden liegt der Energieeintrag noch bei über 100 J pro Sekunde. Die für die Ausbildung der Grenzfläche benötigte Energie ist also selbst im Vergleich zum gesamten Energieeintrag pro Sekunde vernachlässigbar klein und liegt daher simulationstechnisch bei Betrachtung eines kompletten Moduls außerhalb der Rechengenauigkeit. Bei der Beurteilung, auf welcher Größenskala die Grenzflächenenergie einen entscheidenden Einfluss auf die Phasenumwandlung hat, kann das Phasenfeldmodell die Antwort liefern: bei korrekter Entdimensionalisierung mit den Stoffdaten von Paraffin kann Pace3D quantitative richtige Lösungen für den Phasenwechsel

von Paraffin liefern, wenn man ein physikalisches Gebiet im Mikrometerbereich auflöst. Dies erscheint im Kontext dieses Projekts jedoch nicht notwendig, da davon auszugehen ist, dass sich sowohl der energetische Einfluss der Grenzflächenenergie als auch die Auswirkung der Grenzflächenenergie auf die Ausbreitung der Phasengrenzfront bei der Phasenumwandlung auf zu kleinen Skalen abspielen.

Der mit StarCCM+ durch Nichtbeachtung der Grenzflächenenergie zwischen festem und flüssigem Paraffin verursachte Fehler ist somit verschwindend gering.

### 6.1.5 Phasenumwandlung in den Poren von offenporigen Metallschäumen

Auf Basis des erweiterten Phasenfeldalgorithmus wurden Simulationsstudien durchgeführt mit den Modellen für Metallschaum zur Ermittlung des zeitlichen Aufschmelz- bzw. Abkühlvorganges. Hierzu wurden Metallschaummodelle mit 10, 20 und 40 ppi herangezogen.

Durch den Vergleich des Temperaturfeldes bzw. der Temperaturverteilung im Schnitt (Abb. 49, 50) eines 100 ppi- und eines 40 ppi-Schaumes wird deutlich, dass der 40ppi-Schaum zum Zeitpunkt der vollständigen Phasenumwandlung eine erheblich homogenere Verteilung der Temperatur als der 10ppi-Schaum aufweist.

Je höher die ppi-Zahl, also je „feiner“ der Schaum wird, desto größer wird das Verhältnis von Fläche zu Volumen für die wärmeleitende Struktur. Idealerweise hat jeder infinitesimal kleine Anteil Paraffin eine gleich große Kontaktfläche zur wärmeleitenden Struktur. Dies würde einen unendlich feinen Schaum voraussetzen, was aber technisch natürlich nicht machbar ist.

Als Maß dafür kann das A/V-Verhältnis verwendet werden, das z.B. in der Bautechnik eine Kenngröße für die „Kompaktheit“ eines Gebäudes ist. Je kleiner das Verhältnis, desto geringer die Wärmeaustauschfläche im Verhältnis zum Speichervolumen. In unserem Fall wollen wir genau das Gegenteil, ein möglichst großes A/V-Verhältnis, um den Prozess zu beschleunigen. Ein wichtiges Ergebnis dieser Simulationen ist wieder, dass die Geometrie des Schaum einen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Phasenumwandlung hat. Je feiner die Poren, desto schneller die Erstarrung bzw. das Aufschmelzen der Füllung. Der Grund ist die größere Kontaktfläche zwischen dem Metall und der Füllung, was eine effektivere Wärmeübertragung begünstigt.

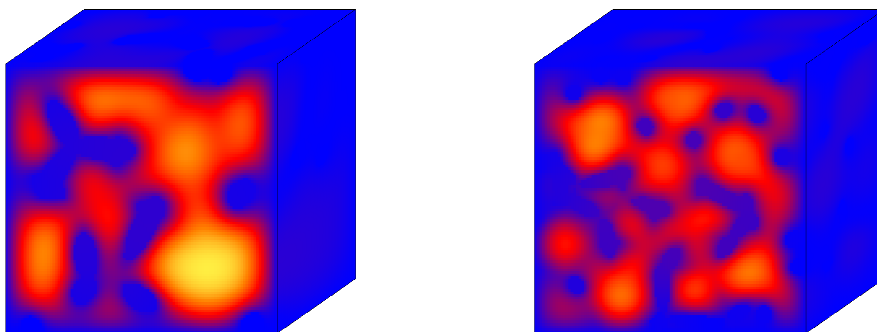


Abbildung 49: Schnitt durch das 3D-Temperaturfeld (links 10 ppi, rechts 40 ppi)

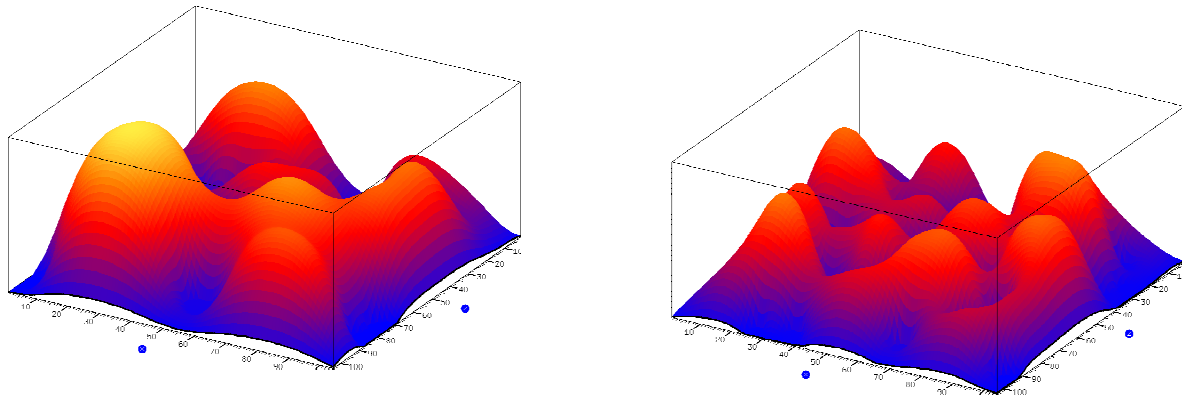


Abbildung 50: Temperaturverteilung in der Ebene (links 10 ppi, rechts 40 ppi)

## 6.2 Nachrechnungen (CFD)

### 6.2.1 Modellbildung und Netzgenerierung

Für die numerische Nachrechnung der Steckblechversuche wurde die Geometrie des Einzelspeichermoduls der Steckblechvariante vereinfacht. In Abbildung 51 sind die Vereinfachungen dargestellt. Die Rohrwendeln wurden, um Rechenzeit zu sparen, nicht mit einer Rippenwand sondern mit einer glatten Rohrwand modelliert. Eine weitere Vereinfachung wird bei den Steckblechenverbindungen untereinander durchgeführt. Hier wurde eine ideale Anbindung abgebildet, was in der Realität zwischen zwei Steckteilen nicht erzielt wird. Dadurch werden Berechnungszellen gespart, da keinen winzigen Spalte existieren.

Aus dem selben Grund wurde die Anbindung zwischen Rohrwendel und Steckblech so abgebildet, dass ein flächenschlüssiger Kontakt entsteht, also die Rohrwendel ideal mit den Steckblechen verbunden ist. Diese Vereinfachung kann vorgenommen werden, da in der CFD-Simulation an diesen Bereichen ein Wärmewiderstand eingesetzt werden kann, der der Paraffindicke zwischen Rohrwendel und Steckblech entspricht. Des Weiteren wurde die Dicke des PP-Zylinders nicht modelliert, um das Berechnungsgebiet klein zu halten. Die Wandstärke der PP-Zylinders kann mittels eines Wärmewiderstands als Randbedingung appliziert werden. Das Berechnungsmodell entspricht der Speichermodulabmessung mit einem Durchmesser von rund 0,3 m und einer Zylinderhöhe von ca. 0,7 m.

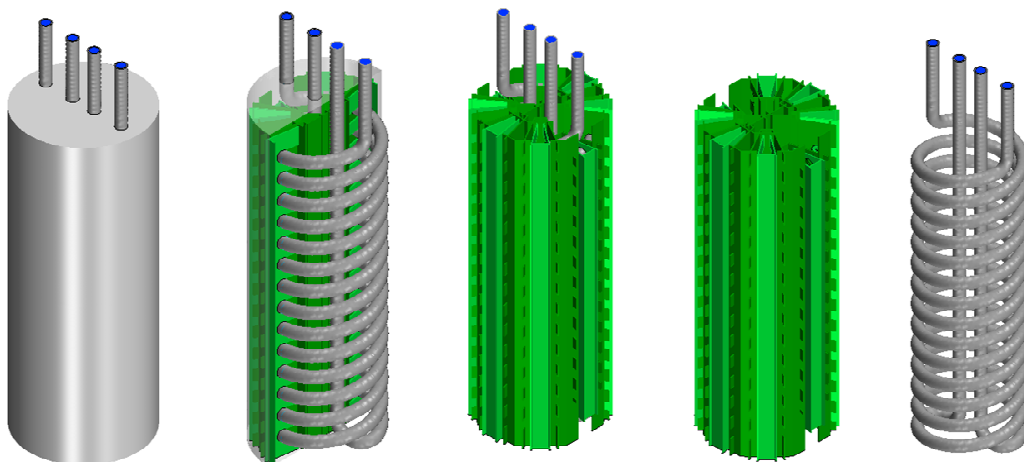


Abbildung 51: Modellbildung für die Steckblechvariante

Das Berechnungsmodell wurde mit Tetraeder-Zellen und einem prismatischen Sublayer, der aus zwei Prism-Layer-Schichten im wandnahen Bereich besteht, vernetzt. Insgesamt hat das Berechnungsmodell damit rund 2,9 Millionen Zellen mit circa 1,3 Millionen Knoten. Bei der Vernetzung wurde das Netz an den Stellen, an denen ein großer Gradient erwartet wird, feiner vernetzt und umgekehrt. In Abbildung 52 ist das generierte Netz dargestellt. In den Nahaufnahmen ist der prismatische Sublayer im wandnahen Bereich der Bleche und der Rohrwendeln deutlich zu erkennen.

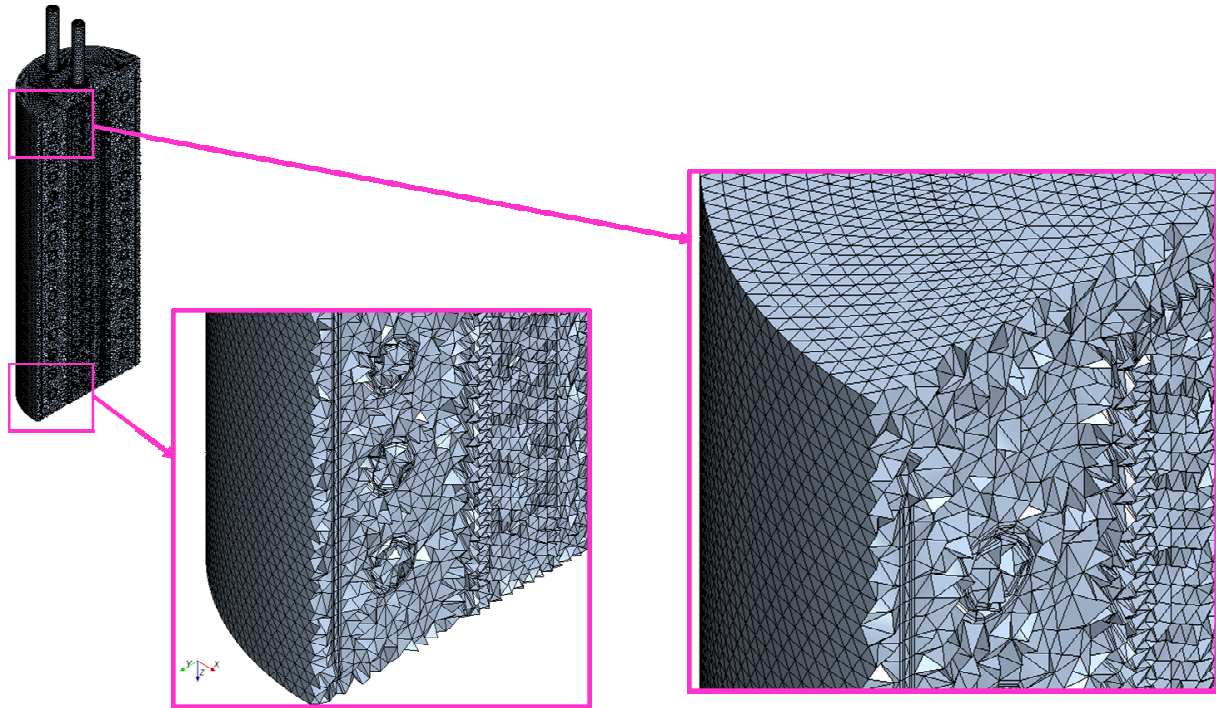


Abbildung 52: Generiertes Netz für die Nachrechnungen

### 6.2.2 Anfangs- und Randbedingungen

Das Berechnungsmodell besteht aus vier unterschiedlichen Domains (Paraffin RT58, Aluminium, Stahl, Wasser). Für die Stoffeigenschaften wurden typische Werte aus dem VDI-Wärmeatlas für Stahl und Aluminium verwendet. Für Paraffin wurden die Herstellerangaben implementiert und die Stoffdaten von Wasser wurden gemittelt auf eine Temperatur von rund 22 °C. Alle vier Berechnungs-Domains bekommen Anfangsbedingungen und Randbedingungen, die aus den Versuchen entnommen wurden. Im Nachfolgenden wird die Nachrechnung eines Belade- und Entladeversuchs erläutert und ausgewertet. Die unterschiedlichen Berechnungen werden in Lastfälle unterteilt.

Bei Lastfall LC01 handelt es sich um den Beladeversuch, bei dem beide Rohrwendeln nacheinander durchströmt werden. Eingestellter Volumenstrom war bei diesem Realversuch im Mittel 5 l/min. Zu Versuchsbeginn war das gesamte Paraffin fest. Folglich wird bei der Nachrechnung das gesamte Paraffinvolumen als fest vorinitialisiert. Die Strömungsgeschwindigkeit und Wassereintrittstemperatur wurden den Messdaten entnommen und als Funktion der Zeit hinterlegt. Genauso wurde die ge-

gemessene Umgebungstemperatur in Abhängigkeit der Zeit als Randbedingung der Zylinderaußenwand aufgeprägt.

Bei Lastfall LC02 handelt es sich um einen Entladeversuch. Auch bei diesem Versuch handelt es sich um ein Doppelwendeexperiment mit einem mittleren Volumenstrom von rund 5 l/min. Allerdings ist bei der Beladung das gesamte Paraffin aufgeschmolzen und wird daher als flüssig vorinitialisiert. Bei der Wassereintrittstemperatur und Strömungsgeschwindigkeit werden wieder die Messdaten in Abhängigkeit der Zeit herangezogen. Darüber hinaus ist die Außentemperatur eine Funktion der Zeit und wird ebenfalls den Messdaten entnommen. In Tabelle 7 sind die Anfangs- und Randbedingungen nochmals übersichtlich dargestellt.

Versuchsart	LC01	LC02
	Beladung	Entladung
Prinzip	Doppelwandel	Doppelwandel
Volumenstrom	5 l/min	5 l/min
Anfangstemperatur	21 °C	71.5 °C
Paraffinzustand	Fest	Flüssig
Eintrittsgeschwindigkeit	$u_{in}=f(t)$	$u_{in}=f(t)$
Eintrittstemperatur	$T_{in}=f(t)$	$T_{in}=f(t)$
Umgebungstemperatur	$T_{\infty}=f(t)$	$T_{\infty}=f(t)$

Tabelle 7: Anfangs- und Randbedingungen

### 6.2.3 Berechnungsergebnisse

In Abbildung 53 ist der zeitliche Temperaturverlauf der drei Sensorenmesspunkte bei  $L = 0,3$  m aus dem Beladeversuch den Berechnungsergebnissen der numerischen Simulation von LC01 gegenübergestellt. Deutlich ist der latente Bereich des Paraffins bei einer Schmelztemperatur um 58 °C herum bei den Messungen und den CFD-Ergebnissen zu erkennen.

Die CFD-Berechnung zeigt einen schnelleren Temperaturanstieg. Der Temperatureintrag verläuft in der Realität deutlich träger. Aus dem Vergleich der Temperaturmessungen wird deutlich, dass die Randbedingungen und die Stoffeigenschaften des Paraffins in der CFD-Berechnung nicht exakt mit den echten Randbedingungen übereinstimmen, da sich eine Abweichung abzeichnet. Auch ist hier nochmals zu erwähnen, dass bei der numerischen Simulation die Stoffdaten des Paraffins konstant gehalten wurden. Die natürliche Konvektion / Durchmischung wird dadurch bei der Berechnung nicht berücksichtigt, was einen weiteren Faktor der Abweichung zwischen Messung und Berechnung darstellt.

In Abbildung 54 ist die berechnete Temperatur der Steckbleche und der Rohrwandung nach 3, 15, 30 und 60 Minuten für Lastfall LC01 (Beladung) dargestellt. Nach 60 Minuten haben alle Strukturkomponenten eine Temperatur von rund 68 °C erreicht. Anhand der Konturplots wird deutlich, dass das Auslassrohr auch noch nach 30 Minuten deutlich kühler ist als die anderen Rohrkomponenten der Doppelwende. Auch zeichnet sich anhand der schlechten Wärmeanbindung (Kontaktflächen zwischen Steckblech und Rohrwende) ein deutlicher Temperaturunterschied auf der



Rohrwand ab. Auch zeigt sich anhand der Abbildungen, dass sich die Steckbleche erst relativ spät im oberen und mittleren Bereich erwärmen.

In Abbildung 55 ist der zeitlich mittlere Temperaturverlauf des Paraffins aus der Messung und der CFD-Berechnung von Lastfall LC02 dargestellt. Die mittleren Temperaturdaten aus Berechnung und Messung stimmen gut überein, was aus dem Diagramm deutlich wird. Für den Entladevorgang wird wesentlich weniger Zeit benötigt als beim Aufschmelzen des Paraffins. Dies ging bereits aus der Interpretation der vorangegangenen Messergebnisse hervor.

Nach rund 40 Minuten hat sich das Paraffin im Einzelspeichermodul um 25 K abgekühlt. Die Wärmeleitung ist folglich im flüssigen Paraffin besser. Des weiteren zeigt sich auch beim Vergleich des zeitlichen Temperaturverlaufs an den Messstellen zwischen Berechnung und Messung eine gute Übereinstimmung. In Abbildung 55 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur bei  $L = 0,5$  m dargestellt. Auch hier zeichnet sich deutlich die latente Phase ab. Wie bereits schon bei Lastfall LC01 festgestellt wurde, verläuft die Temperaturänderung des Paraffins in der Realität deutlich träger als in der numerischen Simulation.

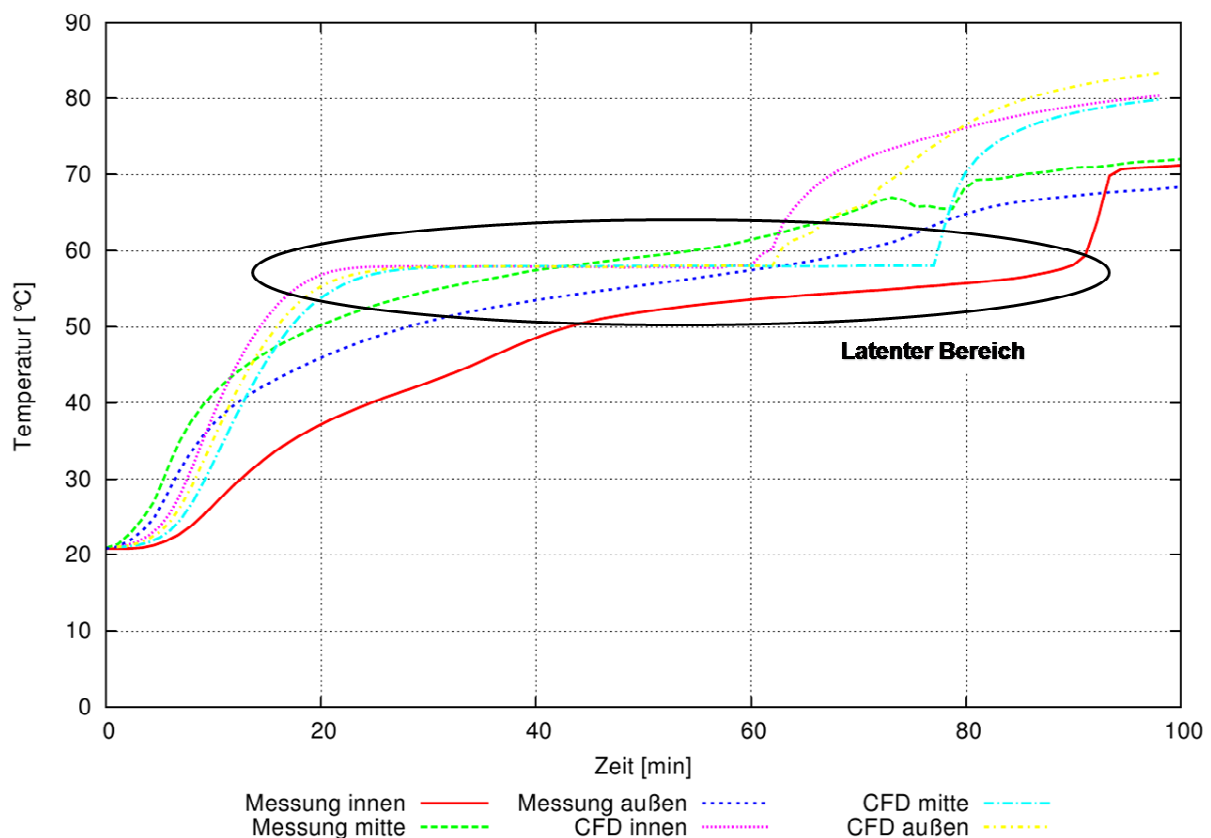


Abbildung 53: Vergleich zeitlicher Temperaturverlauf bei der Beladung



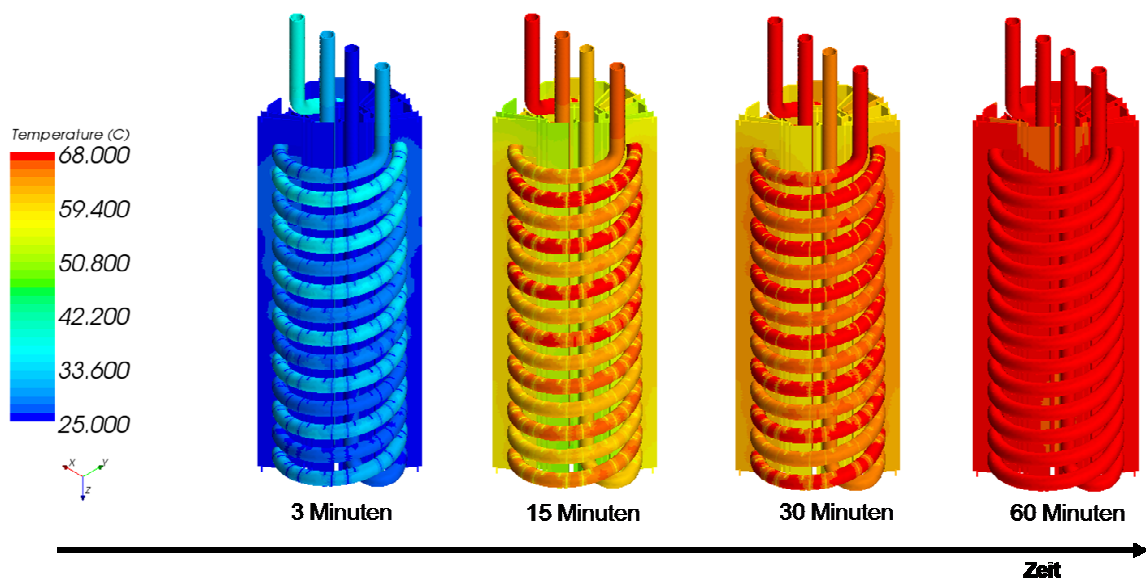


Abbildung 54: Berechnete räumliche Temperaturverteilung bei der Beladung

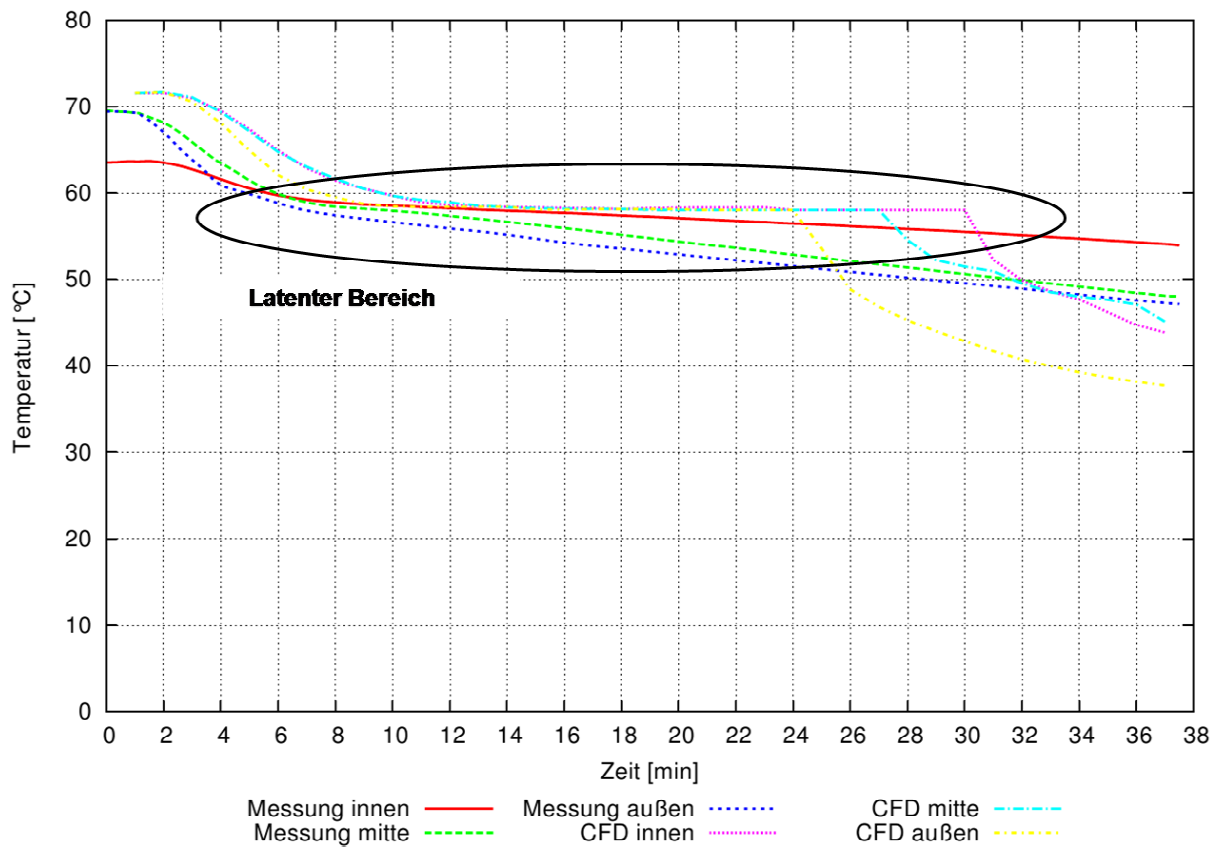


Abbildung 55: Vergleich zeitlicher Temperaturverlauf bei der Entladung

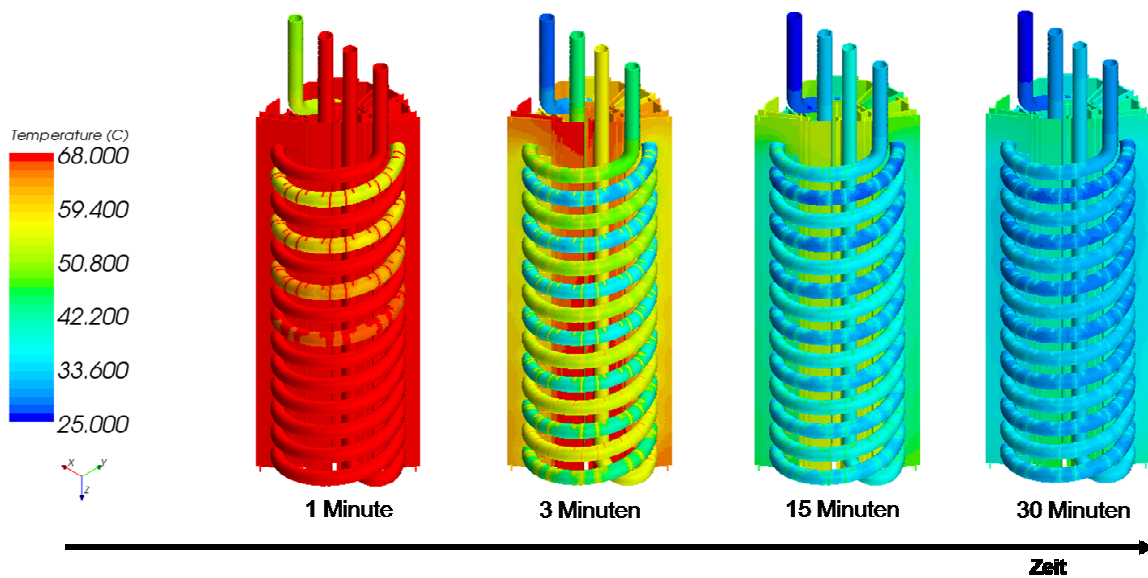


Abbildung 56: Berechnete räumliche Temperaturverteilung bei der Entladung

In Abbildung 56 ist die Temperatur der Steckbleche und der Stahlwendeln zum Zeitpunkt  $t = [1; 3; 15; 30]$  min für Lastfall LC02 dargestellt. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  s hatten alle Komponenten des CFD-Modells einschließlich Wasser und Paraffin eine Anfangstemperatur von  $77$  °C. Bereits nach einer Minute kühlt die Wärmeträgerflüssigkeit am Einlass der Rohrwendel aus Stahl deutlich ab. In der Abbildung 56 (1 Minute) ist deutlich zu erkennen, welchen Weg das Wasser schon zurück gelegt hat. Nach drei Minuten beginnen sich auch schon die Steckbleche abzukühlen. Die erste Rohrwendel, die durchströmt wird, ist zu diesem Zeitpunkt schon deutlich kälter. Nach 15 Minuten haben auch schon die Steckbleche eine Temperatur um  $50$  °C erreicht und die Wandtemperatur der Rohrwendel im Bereich des ersten Drittels der Einlauflänge liegt bei rund  $25$  °C. Nach rund 30 Minuten liegt die Temperatur aller Komponenten um die  $40$  °C. Die Nachrechnungen der Versuche zeigen leichte Abweichungen bezüglich der lokalen Temperaturen. Im Mittel (siehe Abbildung 57) stimmen die Resultate jedoch gut überein.

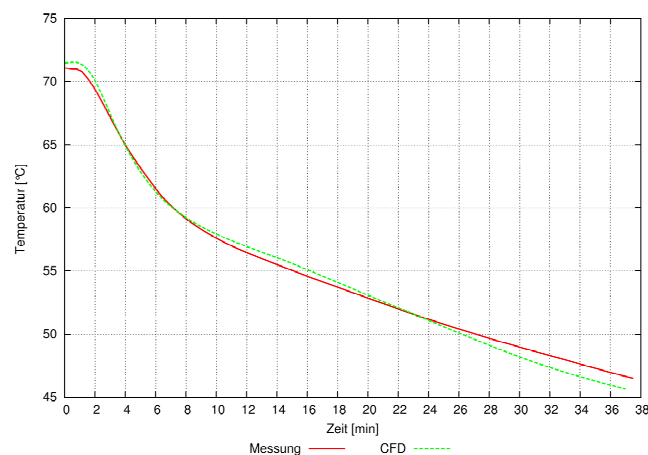


Abbildung 57: Vergleich der mittleren Paraffintemperatur (CFD / Experiment).

## 7 Finaler Demonstrator

Aus den Gesamtergebnissen und den parallel durchgeführten Nachrechnungen auf Basis der optimierten Simulationsmodelle wurde ein Design für den Demonstrator als mobiles Speichersystem entworfen. Gegenüber den bisherigen Annahmen hat sich aus den Versuchsergebnissen ergeben, dass die Beladezeiten akzeptabel sind, aber der erzielbare Temperaturhub bei der Entladung nicht ausreichend für eine Wärmeentnahme z.B. als Duschwasser geeignet ist. Daher hat das Konsortium beschlossen den Latentspeicher als Hybridspeicher auszuführen, um somit den Anforderungen an einer schnellen Entlademöglichkeit bei ausreichendem Temperaturniveau entgegenzuwirken. In Abbildung 58 ist der Demonstrator dargestellt. Das Hybridkonzept sieht vor, dass drei Einzelspeichermodule mit Edelstahlgehäuse in ein Behältnis, das mit Wasser gefüllt werden kann, verbaut werden. Somit sind die mit Paraffin befüllten Einzelspeichermodule von Wasser umgeben. Die gespeicherte Wärme von den Einzelspeichermodulen wird über die Edelstahlgehäuse an das Fluid übergeben. Die Wärmeentnahme erfolgt direkt durch eine Warmwasserentnahme. Der Beladekreislauf ist hiervon unabhängig. Eine weitere Beladung über eine Solarthermieanlage kann somit kontinuierlich weiter betrieben werden. Insgesamt können in dem entwickelten Latentspeicher ca. 8 kWh an Wärme im Temperaturbereich von 50-65 °C gespeichert werden, wobei in den Einzelspeichermodulen alleine bereits 1,8 kWh speicherbar sind.



Abbildung 58: Hybridspeicher mit integrierter Meß- und Regelungstechnik und Touchpanel

Das Hybridspeichersystem ist bereits seriennah ausgeführt und kann als mobiles Vorführgerät Interessenten vorgeführt werden. Es benötigt einen normalen 230 V-Stromanschluss und hat vier Wasseranschlüsse (Belade- und Entladekreislauf). Somit stellt es ein kompaktes autarkes Gerät dar, das vielfältig eingesetzt werden kann. Es ist vergleichbar mit einem kommerziellen Pufferspeicher (Wasser), besitzt aber nachweislich eine höhere Speicherdichte als ein Wasserspeicher. Zudem ist es flexibel an Aufstellbedingungen anzupassen. Weiterhin kann die Speichermenge durch die Modularität des Systems skaliert werden. Am Demonstrator wurden umfangreiche Messungen vorgenommen, die außerhalb des Projektrahmens durchgeführt wurden und daher nicht mehr Gegenstand dieses Abschlussberichtes sind.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das durchgeführte Forschungsvorhaben wird von allen beteiligten Projektpartnern als sehr erfolgreich eingestuft. Neben dem Demonstrator als finales Ergebnis des Forschungsvorhabens konnten eine Reihe weiterer Erfolge verzeichnet werden. So hat das Projektkonsortium erfolgreich folgende essentielle Nebenziele erreicht:

- Schaffung einer validierten Simulationsumgebung für die Berechnung von Phasenwechselfvorgängen
- Aufbau und Inbetriebnahme von mehreren experimentellen Einrichtungen zur Messung von Wärmespeicherungsvorgängen in latenten Materialien und dazugehöriger Mess- und Regelungstechnik
- Erweiterung von Preprozessing-Werkzeugen zur Erzeugung komplexer Mikrostrukturmodelle
- Umfangreiche experimentelle und numerische Ergebnisse, die zu Vergleichszwecken herangezogen werden können
- Höchst funktionale Kooperationsstrukturen zwischen KMU, Hochschule und Universität

Das MStor-Projekt konnte innerhalb des um drei Monate erweiterten Zeitrahmens erfolgreich in 21 Monaten zu Ende geführt werden. Der Demonstrator steht für Hausmessungen bei TinniT zur Verfügung. Weitere Messungen außerhalb des MStor-Zeitrahmens sind in Planung und teilweise in Arbeit, um verschiedene Betriebsszenarien weiter zu erproben. Aus Sicht des Projektkonsortiums wird das Projekt als erfolgreich und erfolgsversprechend für eine Serienentwicklung angesehen.

Vertriebliche Aktivitäten sind bereits eingeleitet. Gespräche sind bereits anvisiert. Das Konsortium hat die Ergebnisse des Projektes bei der ESOF 2012 in Dublin auf dem Gemeinschaftsstand „Research in Germany“ vorgestellt (siehe Abbildungen 59). Im Rahmen des Projektes wurden die Ergebnisse zudem auf Konferenzen, wie z.B. der „Bio-inspired Materials 2012“ in Potsdam, veröffentlicht.





Abbildung 59: Gemeinschaftsstand auf der ESOF 2012 in Dublin